

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

**Studie nového návrhu připojení per pohonu  
sušicího bubnu**

Study of a new Design of the Connection of the  
Drying Drum Drive Pens

Student:

Bc. Pavel Pergler

Osobní číslo:

PER0091

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra aplikované mechaniky

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Pavel Pergler**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 3901T003 Aplikovaná mechanika  
Téma: Studie nového návrhu připojení per pohonu sušicího bubnu  
Study of a new Design of the Connection of the Drying Drum Drive  
Pens  
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

- 1) Studium výkresové dokumentace
- 2) Počítačový model původní konstrukce per
- 3) Počítačový model nového návrhu připojení per
- 4) Deformačně-napětová analýza u obou konstrukčních variant
  - a) bez modelu bubnu
  - b) s částečným modelem bubnu
- 5) Kontrola připojení per na únavu
- 6) Závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené odborné literatury:

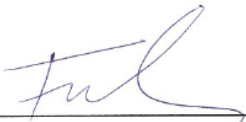
- 1) Výkresová dokumentace firmy Trinom s.r.o.
- 2) Chen, X., Liu Y. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench. CRC Press. 2015. ISBN 978-1-4398-7384-7.
- 3) ANSYS Inc, ANSYS Academic Research, Release 18, Help System
- 4) ANSYS Mechanical User's Guide, © 2013 SAS IP, Inc., Release 16.1, pp. 1858
- 5) Tutorials for ANSYS Workbench <http://www.ansys.com/tutorials>

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Petr Horyl, CSc., dr.h.c.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.  
vedoucí katedry



  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola Báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona)
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněná v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020



Podpis studenta

## ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

PERGLER, P. *Studie nového návrhu připojení per pohonu sušicího bubnu: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra aplikované mechaniky, 2020, 66 s. Vedoucí práce: Horyl, P.

Diplomová práce se zabývá analýzou připojení per pohonu sušicího bubnu a návrhem nového řešení tohoto připojení. V úvodu práce je popsána sušicí pec, rozdělení sušících pecí a konstrukce rotační válcové sušicí pece. Na základě výsledků provedených konečno-prvkových analýz pera a jejich srovnáním byl navržen nový způsob připojení pera. Nový návrh byl dále použit v analýze sestavy pohonu, která simulovala provozní zatížení, a její výsledky byly porovnány s výsledky analýzy sestavy pohonu původního řešení. Pro sestavu pohonu s novým připojením pera byly provedeny další analýzy simulující různé varianty zatížení. V závěru práce je proveden analytický výpočet na únavové poškození, který potvrzuje, že nový způsob připojení per je technicky vhodným řešením.

## ANNOTATION OF MASTER THESIS

PERGLER, P. *Study of a new Design of the Connection of the Drying Drum Drive Pens: Master Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics, 2020, 66 p. Thesis head: Horyl, P.

Master thesis is dealing with an analysis of the connection of the drying drum drive pens and finding a new design solution of the connection. In the beginning of the thesis there is a description of a drying kiln, categorization of drying kilns and design of a rotary drying kiln. Based on the results of finite element analysis of a pen and their comparison there was new design of the connection made. New design was used in finite element analysis of the drive assembly under operating load and results were compared with results obtained from analysis of the original drive assembly. Specific analysis with different load settings of drive assembly with new design of the connection of pen followed. In the end of the thesis there is analytical fatigue calculation which proves that new design of the connection of a pen is suitable technical solution.

## Obsah

Seznam použitých značek a symbolů.....	9
1. Úvod.....	11
2. Sušicí pece.....	12
2.1 Sušicí proces .....	12
2.2 Rozdělení sušicích pecí.....	12
2.2.1 Podle druhu sušicího média.....	12
2.2.2 Podle způsobu proudění sušicího média.....	12
2.2.3 Podle pohybu sušeného materiálu .....	13
2.2.4 Podle provozního tlaku.....	13
2.2.5 Podle převládajícího způsobu sdílení tepla .....	13
2.2.5 Podle způsobu instalace.....	13
2.2.6 Podle způsobu provozu.....	14
2.3 Rotační válcová sušicí pec .....	14
2.4 Konstrukce rotační válcové sušicí pece .....	15
2.4.1 Rotační válec (buben).....	15
2.4.2 Nosné obruče .....	16
2.4.3 Rotační mechanismus .....	17
3. Analýza provozní problematiky .....	19
3.1 Svarové spojení.....	21
4. Analýza pera.....	23
4.2 Původní konstrukce pera.....	23
4.2.1 Materiálové parametry.....	23
4.2.2 Konečno-prvková struktura .....	24

4.2.3	Okrajové podmínky .....	25
4.2.3	Výsledky konečno-prvkové analýzy .....	26
4.3	Návrh nové konstrukce pera č. 1 .....	28
4.3.1	Materiálové parametry.....	28
4.3.2	Konečno-prvková struktura .....	29
4.3.3	Okrajové podmínky .....	29
4.3.4	Výsledky konečno-prvkové analýzy .....	30
4.4	Návrh nové konstrukce pera č. 2 .....	32
4.4.1	Materiálové parametry.....	32
4.4.2	Konečno-prvková struktura .....	32
4.4.3	Okrajové podmínky .....	33
4.4.4	Výsledky konečno-prvkové analýzy .....	34
5.	Analýza pohonu sušícího bubnu .....	36
5.1	Analýza pohonu s původní konstrukcí per .....	36
5.1.1	Materiálové parametry.....	38
5.1.2	Konečno-prvková struktura .....	38
5.1.3	Okrajové podmínky .....	40
5.1.4	Mechanické kontakty.....	41
5.1.5	Výsledky konečno-prvkové simulace pro zatížení vlastní tíhou.....	43
5.1.6	Výsledky konečno-prvkové simulace pro celkové zatížení .....	44
5.2	Analýza pohonu s navrženými pery č. 2.....	46
5.2.1	Materiálové parametry.....	47
5.2.2	Konečno-prvková struktura .....	47
5.2.3	Okrajové podmínky .....	48

5.2.4	Mechanické kontakty.....	49
5.2.4	Výsledky konečno-prvkové simulace pro zatížení vlastní tíhou.....	50
5.2.5	Výsledky konečno-prvkové simulace pro celkové zatížení .....	52
5.3	Analýza pohonu s navrženými pery č. 2 s pootočením .....	54
5.4	Analýza pohonu s navrženými pery č. 2 s uvažáním nesymetrie zatížení.....	56
6.	Kontrola pohonu vůči únavovému poškození.....	58
7.	Závěr .....	62
8.	Seznam použité literatury.....	64
	Poděkování.....	66



## Seznam použitých značek a symbolů

$A_W$	$[m^2]$	Účinná plocha svaru
$l$	$[m]$	Délka svaru
$E$	$[MPa]$	Modul pružnosti v tahu
$\mu$	$[-]$	Poissonovo číslo
$F$	$[N]$	Síla
$R_e$	$[MPa]$	Mez kluzu
$R_m$	$[MPa]$	Mez pevnosti
$g$	$[m \cdot s^2]$	Tíhové zrychlení
$F_r$	$[N]$	Radiální síla
$F_t$	$[N]$	Tangenciální síla
$MPa$		Megapascal
$mm$		Milimetr
$\sigma_{ek}$	$[MPa]$	Ekvivalentní napětí
$\sigma_{aHMH}$	$[MPa]$	Amplituda napětí podle hypotézy HMH
$\alpha_C$	$[-]$	Materiálová konstanta
$\sigma_{m,max}$	$[MPa]$	Maximální střední napětí
$\sigma_{cC}$	$[MPa]$	Mez únavy dle Crosslanda
$\sigma_{h1}$	$[MPa]$	Horní napětí cyklu 1
$\sigma_{h2}$	$[MPa]$	Horní napětí cyklu 2
$\sigma_{h3}$	$[MPa]$	Horní napětí cyklu 3
$\sigma_{d1}$	$[MPa]$	Dolní napětí cyklu 1
$\sigma_{d2}$	$[MPa]$	Dolní napětí cyklu 2
$\sigma_{d3}$	$[MPa]$	Dolní napětí cyklu 3

$\sigma_{a1}$	[MPa]	Amplituda napětí 1
$\sigma_{a2}$	[MPa]	Amplituda napětí 2
$\sigma_{a3}$	[MPa]	Amplituda napětí 3
$\sigma_c$	[MPa]	Mez únavy pro symetricky střídavý cyklus
$\sigma_{hc}$	[MPa]	Mez únavy pro míjivý cyklus
$k$	[–]	Bezpečnostní faktor
$\sigma_{1t}$	[MPa]	Maximální redukované napětí při zatížení tíhou u původní konstrukce
$\sigma_{1c}$	[MPa]	Maximální redukované napětí při celkovém zatížení u původní konstrukce
$\varepsilon_{1t}$	[MPa]	Celkové posunutí při zatížení tíhou u původní konstrukce
$\varepsilon_{1c}$	[MPa]	Celkové posunutí při celkovém zatížení u původní konstrukce
$\sigma_{2t}$	[MPa]	Maximální redukované napětí při zatížení tíhou u nově navržené konstrukce
$\sigma_{2c}$	[MPa]	Maximální redukované napětí při celkovém zatížení u nově navržené konstrukce
$\varepsilon_{2t}$	[MPa]	Celkové posunutí při zatížení tíhou u nově navržené konstrukce
$\varepsilon_{2c}$	[MPa]	Celkové posunutí při celkovém zatížení u nově navržené konstrukce
CAD		Computer aided design
GB		Gigabyte
RAM		Random access memory

# 1. Úvod

Rotační válcové sušicí pece jsou strojní zařízení, která umožňují sušení mnoha druhů sypkých materiálů. Mohou být vybaveny různou sušicí technologií, což zajišťuje jejich širokou škálu použití. Sušicí jednotky lze tedy použít pro mnoho aplikací. Sušit v sušicích jednotkách lze jemné i abrazivní materiály, jako jsou látky chemického průmyslu, stavební materiály, kamení, kaly, různé druhy odpadů, sklo, biomasy a mají také využití při recyklaci.

Výrobou těchto válcových sušicích jednotek se zabývá společnost Trinom, s. r. o., která byla založena v roce 1991. Společnost se zabývá konstrukcí, strojírenskou výrobou a montáží ocelových konstrukcí, potrubních rozvodů, topných soustav a technických izolací. Mezi cílové zákazníky společnosti Trinom, s. r. o., patří zejména chemické provozy, energetická zařízení, spalovny odpadů, cementárny, vápenky, lomy, hutě či dřevozpracující provozy. [6] [8] [9]



Obrázek 1.1 – Buben rotační válcové pece [13]

## 2. Sušicí pece

Slunce a vítr byly základními prvky pro sušicí proces. Přirozená touha tento proces urychlit vedla k vyvíjení nových technologií sušicího procesu. Jak účinněji využívat teplo a proudění vzduchu byly zásadní myšlenky, které vedly k získání kvalitnějších metod sušení a k maximalizování sušicího procesu. Od slunce a větru přes nepohyblivé pece jsme se s rozvíjícím se průmyslem a dlouhým technologickým vývojem dostali až k současným složitým sušicím systémům. [7] [8] [9]

### 2.1 Sušicí proces

Sušicí proces je postupný děj, během kterého je zadržaná kapalná fáze neboli vlhkost odstraňována z tuhé fáze. Tohoto efektu je dosahováno metodami mechanickými, fyzikálně-chemickými a tepelnými. Podmínkou průběhu sušicího procesu je předpoklad, že sušený materiál je více nasycený vlhkostí než sušicí médium. Tomuto vlhkému materiálu je zapotřebí dodat takové množství tepla, aby kapalina obsažená v materiálu změnila své skupenství na plyné. [7] [8] [9]

### 2.2 Rozdělení sušicích pecí

Sušicí pece lze rozdělit podle mnoha kritérií.

#### 2.2.1 Podle druhu sušicího média

- Teplovzdušná sušárna – sušení pomocí vzduchu
- Spalinová sušárna – sušení pomocí spalin
- Inertní sušárna – sušení inertním plynem
- Sušárna s přehřátou parou – sušení přehřátou parou

[7] [9]

#### 2.2.2 Podle způsobu proudění sušicího média

- Sušení ofukováním – sušicí médium proudí podél sušeného materiálu
- Sušení profukováním – sušicí médium proudí vrstvou sušeného materiálu
- Impaktní sušení – sušicí médium proudí kolmo na povrch sušeného materiálu
- Sušení v proudu – sušicí médium unáší sušený materiál
- Sušení fluidní – sušený materiál se vznáší v proudu sušicího média

[7] [9]

### 2.2.3 Podle pohybu sušeného materiálu

- Sušený materiál je v klidu nebo občasném pohybu – roštová, skříňová sušárna
- Pohyb způsobuje potenciální energie sušeného materiálu – sesypná sušárna
- Pohyb způsobuje kinetická energie sušeného materiálu – proudová, fluidní, rozprašovací sušárna

Pohyb zprostředkovává mechanické dopravní zařízení.

- Lineární pohyb – pásová, válečková, řetězová, šneková, vibrační, hrabadlová sušárna
- Rotační pohyb – pohyb zajišťuje otáčení sušicího prostoru
  - Kontaktní – talířová, válcová sušárna
  - Konvekční – válcová, trubková sušárna

[7] [9]

### 2.2.4 Podle provozního tlaku

- Sušení za atmosférického tlaku
- Sušení se stálým tlakem
- Sušení za pulzujícího atmosférického tlaku
- Sušení za vakua
- Sušení za přetlaku

[7] [9]

### 2.2.5 Podle převládajícího způsobu sdílení tepla

- Konvenční sušárna – konvekční sušení
- Kontaktní sušárna – kontaktní sušení
- Sálavá sušárna – sálavé sušení
- Dielektrická sušárna – dielektrické sušení
- Odporová sušárna – odporové elektrické sušení
- Ultrazvuková sušárna – ultrazvukové sušení
- Mikrovlnná sušárna – mikrovlnné sušení

[7] [9]

### 2.2.5 Podle způsobu instalace

- Stabilní
- Mobilní

[7] [9]

### 2.2.6 Podle způsobu provozu

- Sušení periodické – periodická sušárna
- Sušení kontinuální – kontinuální sušárna

[7] [9]

## 2.3 Rotační válcová sušicí pec

Rotační válcová sušicí pec je kontinuální strojní zařízení, jehož hlavní součástí je válec neboli buben. Typický průměr pomalu rotujícího bubnu je 2-3 metry. Buben je uložen ve vodících kladkách s mírným náklonem a otáčí se prostřednictvím pohonu, kterým může být například ozubený věnec umístěný na vnějším obvodu bubnu. Uvnitř bubnu se přesypává sušený materiál a ten je v kontaktu se sušicím médiem. Díky mírnému náklonu se sušený materiál posouvá směrem k níže položenému konci a následně usušený vypadává do výsypky. Uvnitř bubnu jsou zkonstruovány tzv. vestavby, které umožňují zvětšení styku sušeného materiálu a sušicího média. Do bubnu je vháněno sušící médium ze spalovací komory. Dle konstrukce sušárny pak může být médium vháněno do bubnu různými způsoby, jak bylo popsáno v předchozí podkapitole.

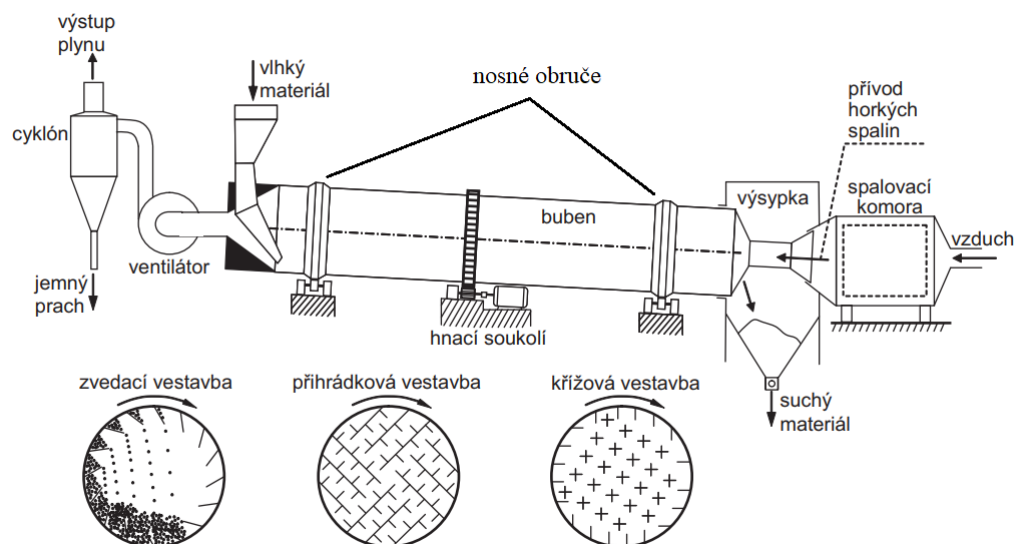
[7] [8] [10]



Obrázek 2.1 – Rotační válcová pec [14]

## 2.4 Konstrukce rotační válcové sušicí pece

Na obrázku níže lze vidět schéma určité rotační válcové sušicí pece a 3 typy vestavby. V následujících podkapitolách budou popsány hlavní části konstrukce podstatné pro tuto práci.



Obrázek 2.2 – Schéma rotační válcové pece [15]

### 2.4.1 Rotační válec (buben)

Největší a nejcharakterističtější částí rotační válcové sušicí pece je rotační válec neboli buben. Hlavní proces při chodu tohoto zařízení probíhá právě v bubnu, kde se materiál suší. V bubnu se během procesu suší velké množství suroviny a vzhledem k tomu, že je surovina navíc nasycená kapalinou, sušený objem má velkou hmotnost. Konstrukce bubnu musí tedy být dostatečně tuhá. Během otáčení se mohou větší objemy suroviny „přilepit“ k bubnu a uvolnit se během následného otočení, což způsobuje rázy, a tudíž ještě větší zatížení.

Buben zároveň musí odolávat vysokým teplotám. Pláště rotačních bubnů jsou zpravidla vyrobeny z materiálů s nízkou tepelnou vodivostí, aby bylo zabráněno únikům tepla skrz stěnu bubnu. Díky použití vhodných materiálů je zvýšena účinnost sušicího procesu. Tloušťka pláště je druhá podstatná charakteristika, na kterou musí být brán zřetel. Větší tloušťka zajistí menší úniky tepla, avšak zvyšuje celkovou hmotnost bubnu, což může způsobovat provozní problémy. Větší tloušťka také znamená použití většího množství materiálu, a tedy vyšší cenu zařízení. Při navrhování konstrukce je tedy zapotřebí najít kompromis mezi ekonomickými a technologickými faktory.



Součástí bubnu je vestavba, která se nachází uvnitř bubnu. Úkolem vestavby je rozhrnovat materiál a vynášet jej po stěnách bubnu tak, aby následně po vykonání části otočení se sesypával přes proudící horký vzduch. Tímto se opět zvyšuje efektivita procesu. Vestavba může být zkonstruována mnoha způsoby. Na obrázku č. 3 jsou vyobrazeny 3 možnosti konstrukce vestavby. [7] [8]

#### 2.4.2 Nosné obruče

Vzhledem k délce bubnu, která se pohybuje v řádu desítek metrů, je nezbytné, aby byl adekvátně uložen. K tomu slouží nosné obruče opřené o vodící kladky s radiálními kolečky. Vodící kladky disponují podpůrnými válečkovými ložisky, která nesou tíhu válce. Tímto mechanismem je zajištěn plynulý rotační pohyb bubnu. [7] [8]



Obrázek 2.3 – Nosné obruče [16]



### 2.4.3 Rotační mechanismus

Konstrukčních možností rotačních mechanismů je několik a jejich volba závisí na určitých faktorech. Rotační mechanismus může být: [7] [8]

**Třecí** – Mechanismus užívaný u menších pecí s nižším výkonem pohonu. Buben se otáčí v důsledku tření mezi pláštěm bubnu a radiálními kladkami, na kterých je buben uložen. Tyto kladky jsou poháněny motorem o požadovaném výkonu. Třecí mechanismus je většinou užíván u pecí s průměrem bubnu do 1,8 metru.

**Řetězový** – V tomto mechanismu se užívá spojení mezi řetězem a ozubením na obvodu bubnu. Jako v předchozím případě je zde motor, který pohání ozubená kola, na kterých je řetěz. Ten svým pohybem roztáčí buben přes ozubení na jeho obvodu.



Obrázek 2.4 – Řetězový mechanismus [17]

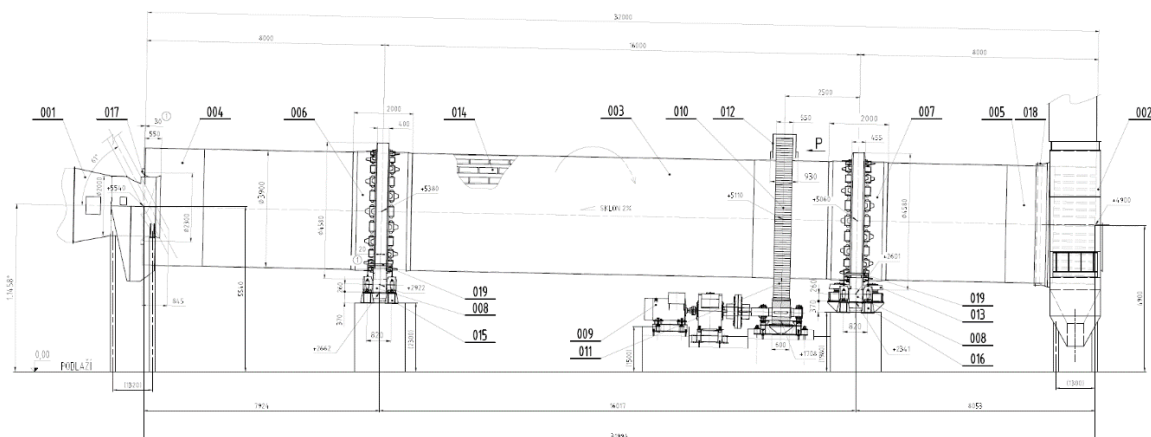
**Převodový** – Tento mechanismus se užívá pro velké rotační pece. V tomto případě je buben zasazen do ozubeného věnce, který je určitým konstrukčním provedením spojen s pláštěm bubnu. Tento velký ozubený věnec je zasazen do převodového systému, kde, zjednodušeně řečeno, motor roztáčí hřídel s pastorkem a ten roztáčí velký ozubený věnec.



Obrázek 2.5 – Převodový mechanismus [18]

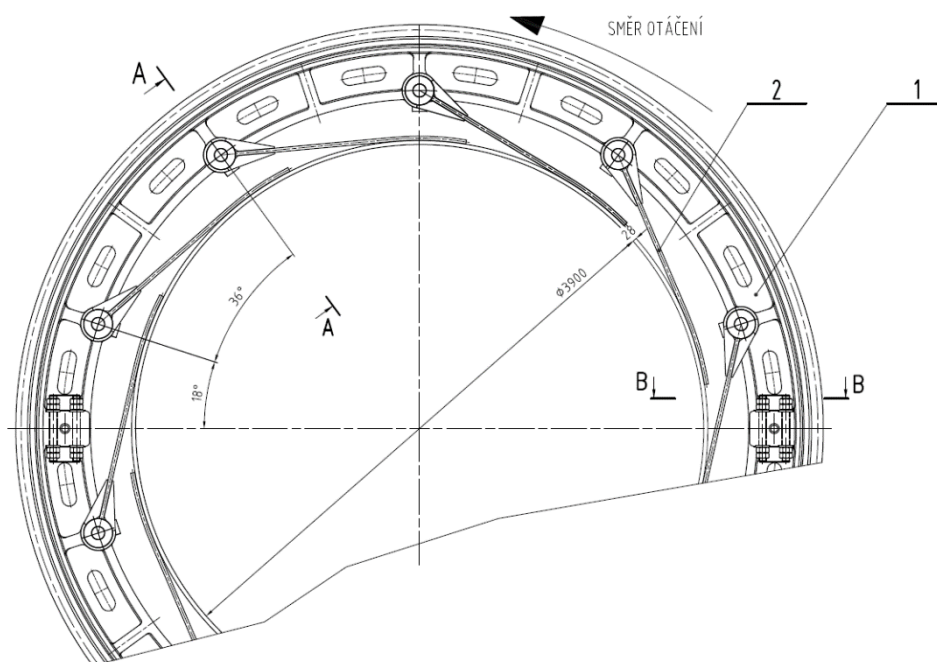
### 3. Analýza provozní problematiky

Tato práce se zabývá problematikou převodového systému konkrétního konstrukčního řešení sušící pece společnosti Trinom, s.r.o.

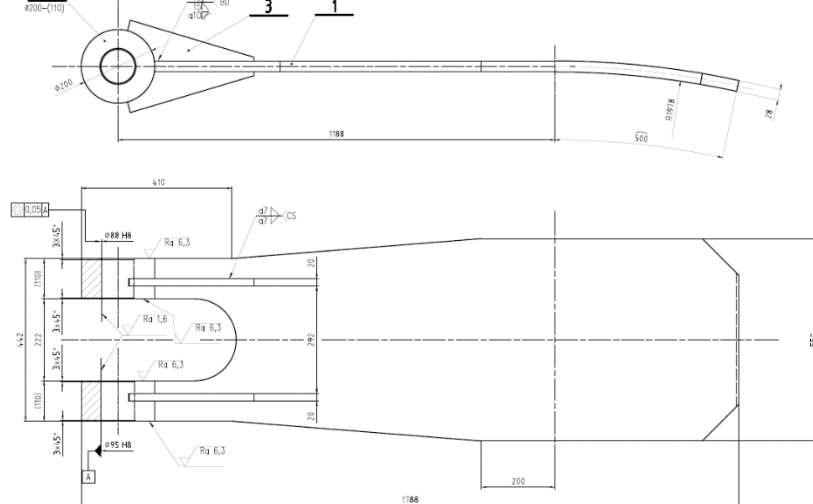


Obrázek 3.1 – Část výkresu sestavy sušící pece [1]

Jak již bylo zmíněno, jedná se o převodový systém sušící pece, jejíž buben má průměr téměř 4 metry a je dlouhý necelých 32 metrů. Ozubený věnec o přibližném průměru 5 metrů je spojen s pláštěm bubnu prostřednictvím deseti per, která jsou k věnci připevněna pomocí kloubů. Mezi jednotlivými klouby je na obvodu rozteč 36 stupňů, což odpovídá deseti perům.

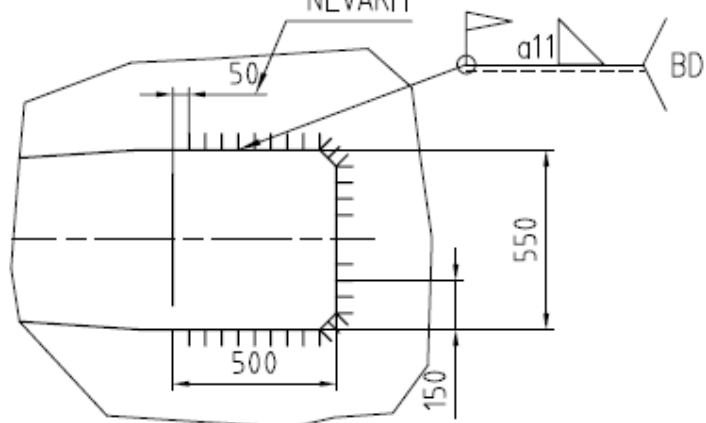


Obrázek 3.2 – Část výkresu ozubeného věnce [1]



Obrázek 3.3 – Část výkresu pera [1]

Z obrázku je patrné, že vidlicová část pera slouží ke kloubovému spojení s ozubeným věncem. Každá část vidlice je vyztužena žebrem na spodní i vrchní straně, což slouží ke zvýšení tuhosti. Druhá strana pera slouží ke spojení s pláštěm bubnu pomocí svaru. Střednice této části kopíruje křivost střednice bubnu. Tedy „zahnutá“ část pera má stejný poloměr jako buben, aby svojí plochou „dosedala“ na plochu bubnu. Na zmiňované „zahnuté“ části pera je podél stran svarové spojení, které je zobrazeno na obrázku níže.

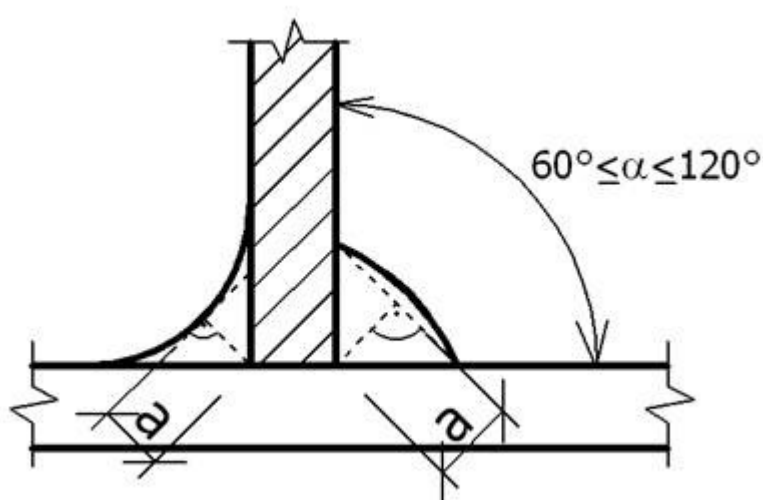


Obrázek 3.4 – Část výkresu pera [1]

Při provozu se věnec otáčí, čímž táhne pera pomocí kloubových spojení a ty „tahají“ přes svary buben. Je tedy zřejmé, že silový tok do per vstupuje přes klouby a pokračuje svary do pláště bubnu. Důsledkem je, že na začátku svaru vzniká vysoká koncentrace napětí, a tedy dochází ke vzniku únavových trhlin v tělese pera.

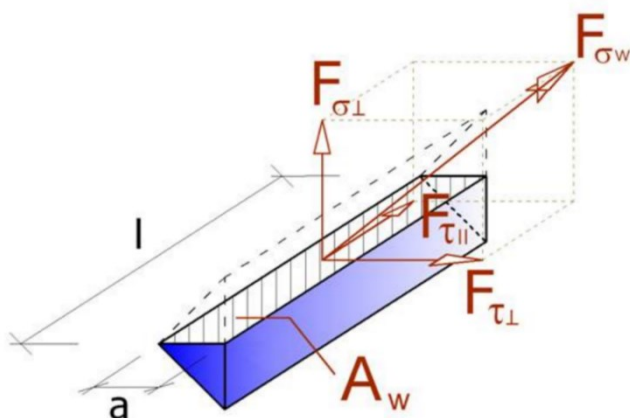
### 3.1 Svarové spojení

Klíčovou roli v simulaci má svarové spojení. Konkrétně se jedná o koutový svar. Hlavní atribut koutového svaru je jeho účinná tloušťka, což je výška trojúhelníku vepsaného mezi tavné plochy a povrch svaru, která se značí „a“.



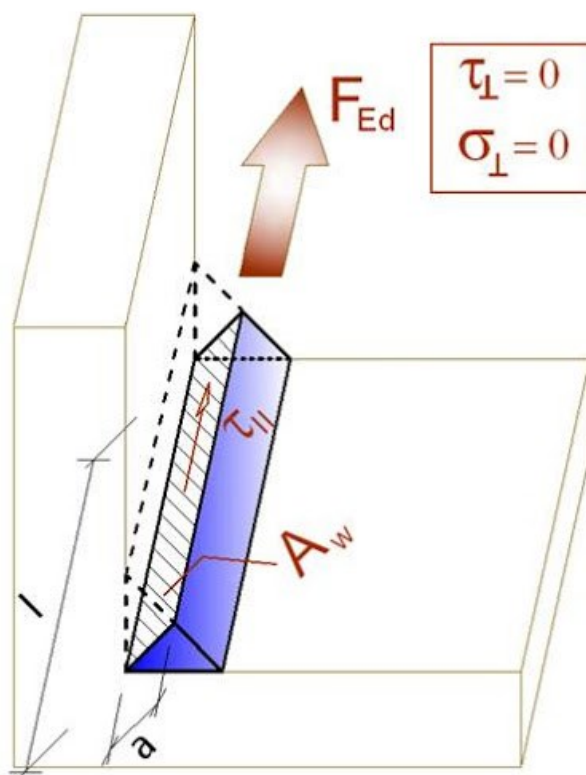
Obrázek 3.5 – Schéma koutového svaru [19]

Při namáhání koutového svaru, síla, která působí na svar, se rozkládá do složek rovnoběžných a příčných vzhledem k podélné ose svaru a kolmých a příčných vzhledem k účinné rovině svaru. Viz obrázek níže, kde  $A_w$  je účinná plocha svaru a  $l$  délka svaru.



Obrázek 3.6 – Schéma rozložení zatížení ve svaru [20]

Pokud síla působí rovnoběžně s podélnou osou svaru, normálová napětí neboli napětí kolmá k podélné ose svaru jsou nulová.



Obrázek 3.7 – Schéma rozložení zatížení ve svaru [21]

Nutným požadavkem pro svařování je vytvoření termodynamických podmínek, které umožňují vznik nových „meziatomárních“ vazeb. Během svařování se tedy působí tlakem či teplem nebo oběma faktory najednou. Působení vysoké teploty má za následek vznik tepelně ovlivněné oblasti. Taková oblast je část základního materiálu, ve které jsou změněny původní vlastnosti materiálu a struktura. V této práci se neuvažuje taková oblast. Svar je v následujících simulacích modelován jako těleso se stejnými materiálovými vlastnostmi, jako má pero.

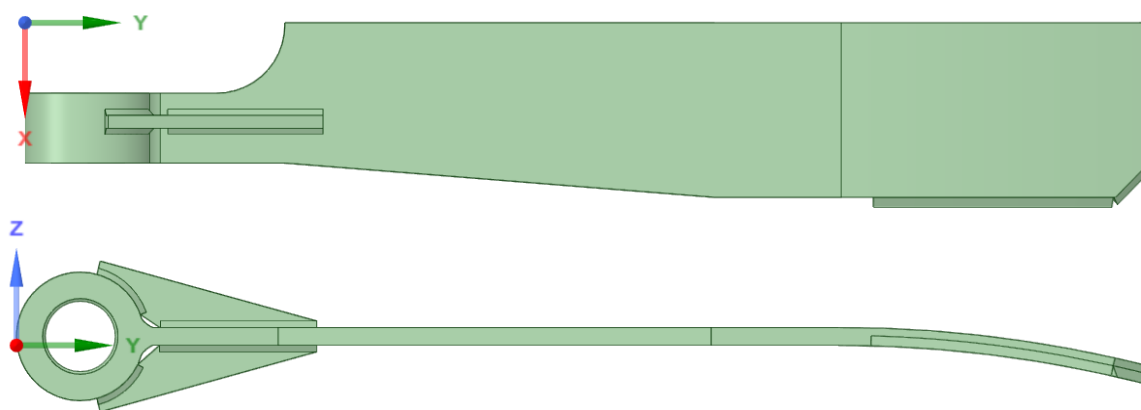
[11] [12]

## 4. Analýza pera

Za účelem detailního pochopení problému je v této kapitole řešena analýza samostatného pera. Díky výsledkům simulace bude dále možno navrhnout nová řešení konstrukce.

### 4.2 Původní konstrukce pera

Pro konečno-prvkovou simulaci bylo nutné nejdříve vytvořit geometrii neboli CAD model původního pera. K vytvoření geometrie bylo využito programu SpaceClaim. Vzhledem k jednoduchosti analýzy bylo možné vynechat zjednodušování a vytvořit detailní geometrii pera. Při tvorbě geometrie bylo využito symetričnosti součásti, tudíž byla vytvořena pouze polovina pera. Všechny další postupy včetně simulací byly provedeny v prostředí programu Ansys Workbench.



Obrázek 4.1 – Původní pero: Geometrie

#### 4.2.1 Materiálové parametry

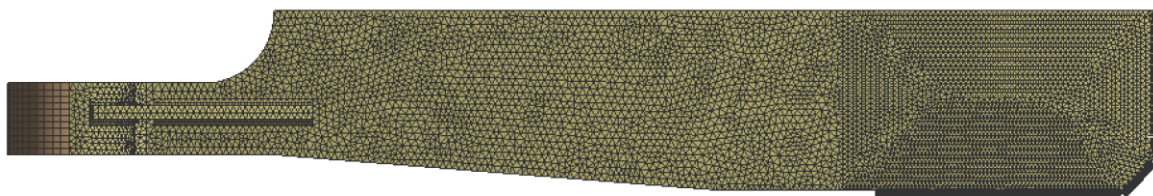
Pro výpočet bylo uvažováno lineární chování materiálu, kde vztah mezi napětím a poměrnou deformací je definován Hookovým zákonem. Pro materiál byly uvažovány parametry běžné konstrukční oceli a to:

- modul pružnosti v tahu:  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa},$
- poissonovo číslo:  $\mu = 0,3.$

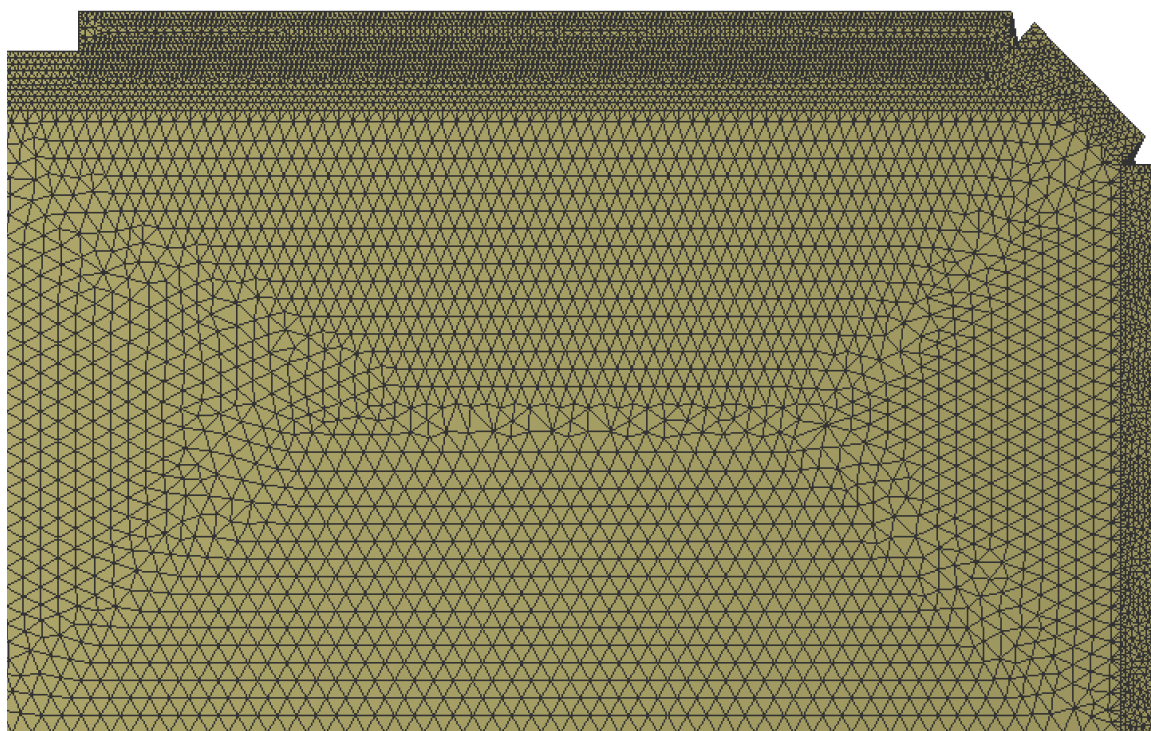


#### 4.2.2 Konečno-prvková struktura

Geometrie byla následně použita k vytvoření konečno-prvkového modelu, kde byl kladen důraz na zjemnění sítě v klíčových oblastech, tedy v blízkosti svaru a svar samotný. Jelikož analýza je poměrně jednoduchá, nebylo zapotřebí se snažit o co nejnížší počty elementů, a tedy byly použity elementy tvaru tetraedru. Pero bylo vytvořeno pomocí 157 701 elementů a 256 347 uzlů.

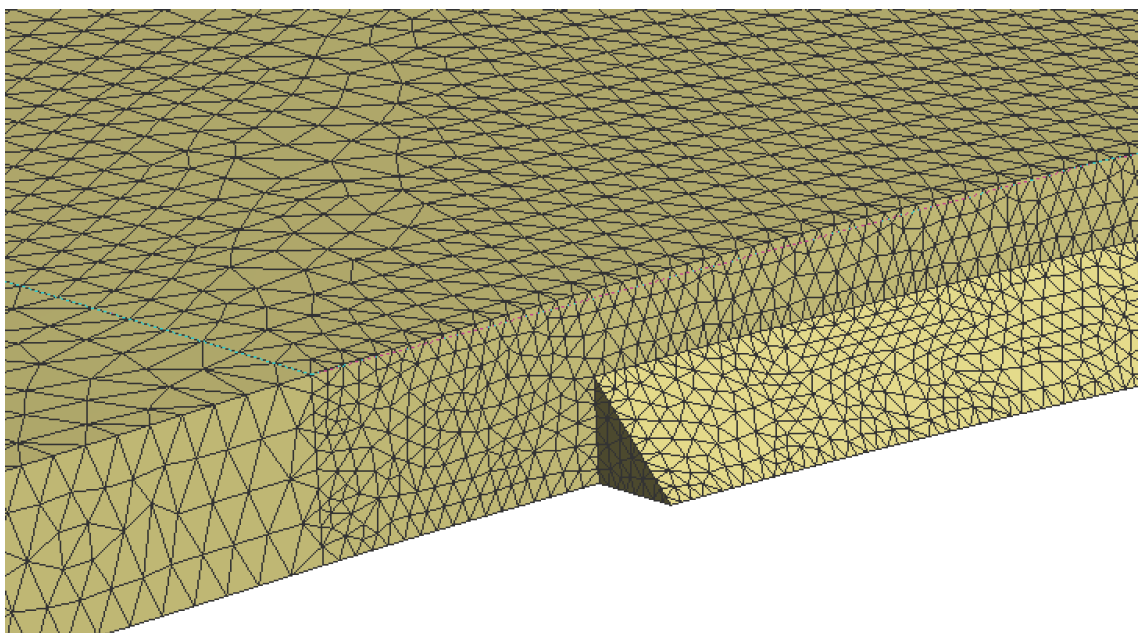


Obrázek 4.2 – Původní pero: Konečno-prvkový model



Obrázek 4.3 – Původní pero: Spodní strana konečno-prvkového modelu





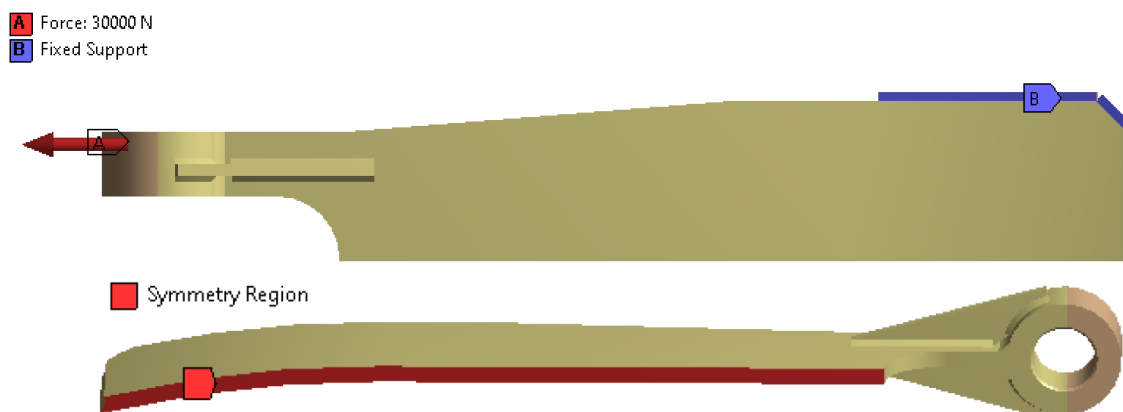
Obrázek 4.4 – Původní pero: Detail konečno-prvkového modelu

### 4.2.3 Okrajové podmínky

Nezbytné pro nastavení výpočtu jsou okrajové podmínky. V tomto výpočtu je uvažováno pouze:

- zatížení silou v kloubu pera:  $F = 30\,000\text{ N}$ ,
- pevné uchycení na spodní straně svarů, které reprezentuje svaření s bubnem,
- nastavení symetrie tělesa.

Tyto okrajové podmínky ovšem nerepresentují reálné provozní zatížení. Slouží pouze k prvotnímu srovnávacímu výpočtu a návrhu nového řešení.

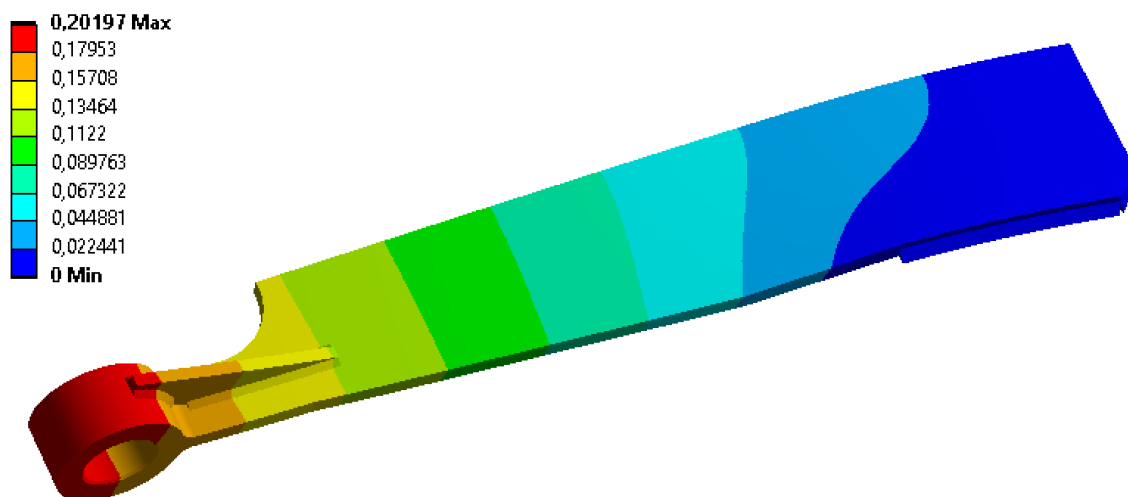


Obrázek 4.5 – Původní pero: Okrajové podmínky

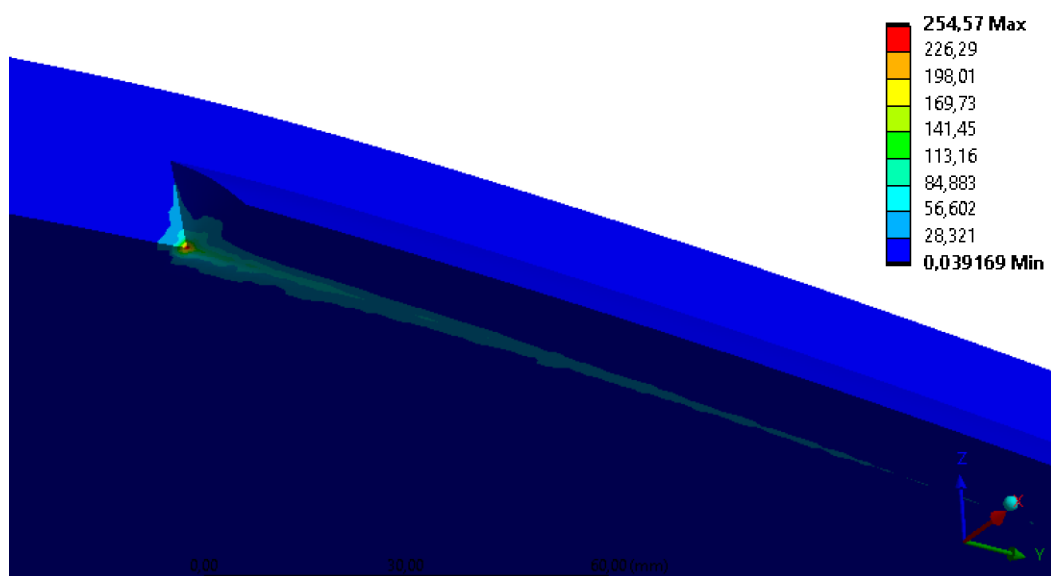
### 4.2.3 Výsledky konečno-prvkové analýzy

Výsledky konečno-prvkové simulace potvrdily předpoklad, že na začátku svaru se vyskytuje místo zvýšené koncentrace napětí. Vysoké hodnoty prokazují, že při cyklickém zatížení v tomto místě bude docházet k únavovému poškození. Je zřejmé, že v dalších částech svaru je oproti začátku svaru velmi nízké napětí a svar se v těchto místech stává v podstatě zbytečným. Z výsledků posunutí je patrné, že k největšímu posunutí dochází v kloubu, kde je aplikována síla.

Výsledky jsou prezentovány formou barevných map popisujících velikost redukovaného napětí a posunutí. Hodnoty redukovaného napětí je dále možné porovnat s materiálovými parametry, jako jsou mez kluzu či mez pevnosti. Nutno opět podotknout, že tato simulace neodpovídá skutečnému provoznímu zatížení.

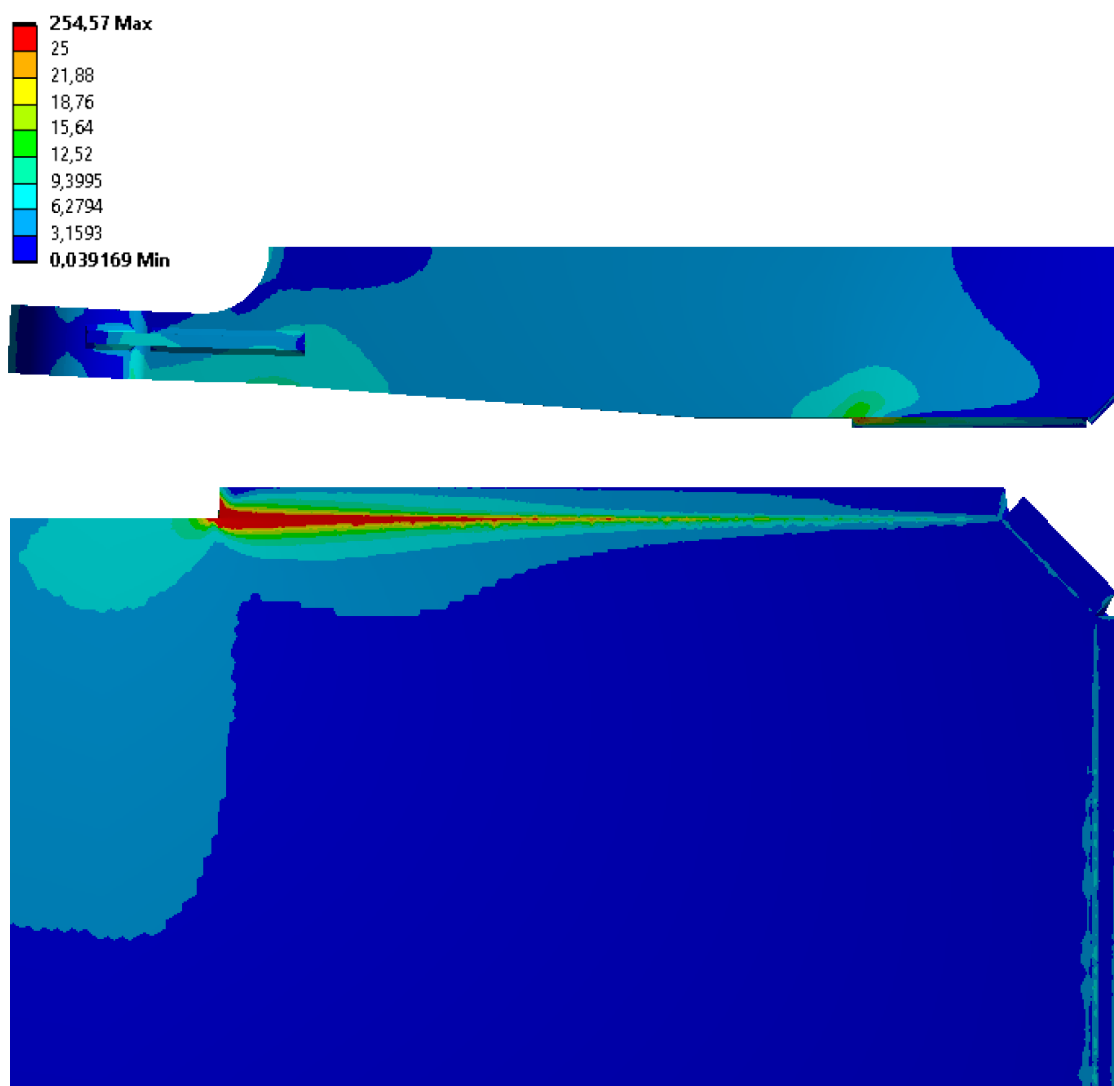


Obrázek 4.6 – Původní pero: Celkového posunutí [mm]



Obrázek 4.7 – Původní pero: Redukované napětí [MPa]

Pro přehlednější zobrazení výsledků byla použita nelineární stupnice napětí.

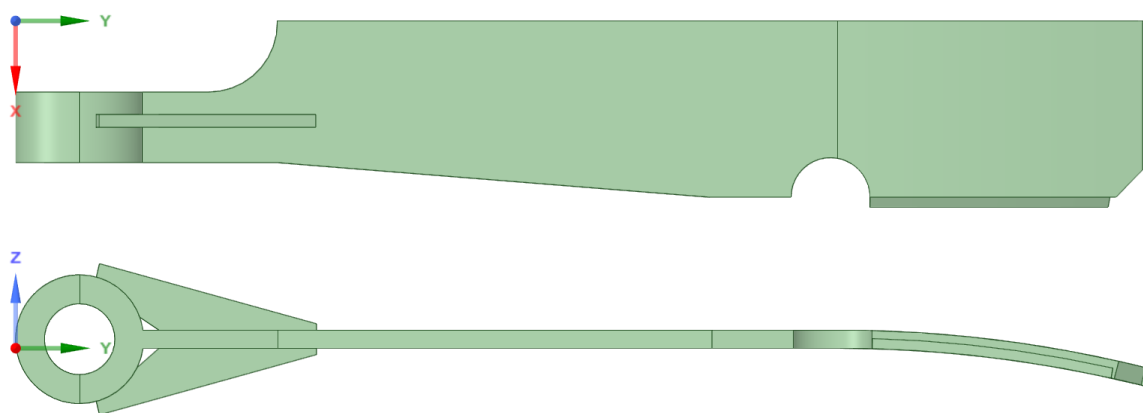


Obrázek 4.8 – Původní pero: Redukované napětí s nelineární stupnicí [MPa]

### 4.3 Návrh nové konstrukce pera č. 1

Na základě výsledků analýzy původního pera bylo možné navrhnout nové řešení, které by vedlo ke snížení hodnot redukovaného napětí v kritickém místě a tím k zamezení únavového poškození.

Jedna z možností, jak snížit napětí, byla přidat plochu, která je pevně spojena s bubnem. Takové řešení by ovšem nevedlo k razantnímu snížení, jelikož silový tok by opět „narážel“ do čela svarů. Ke snížení hodnot napětí bylo potřeba přerušit nebo lépe rozložit silový tok do svarového spojení. S touto myšlenkou byla vytvořena geometrie pera s kruhovou výsečí o průměru 125 mm před čelem svaru. Z obrázku níže je také patrné, že byl kompletně odstraněn „šikmý“ svar, který byl zcela zbytečný.



Obrázek 4.9 – Návrh č. 1: Geometrie

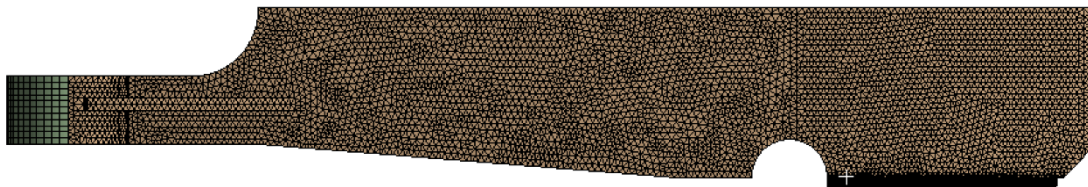
#### 4.3.1 Materiálové parametry

Materiálové parametry jsou shodné jako v předchozím případě, tedy:

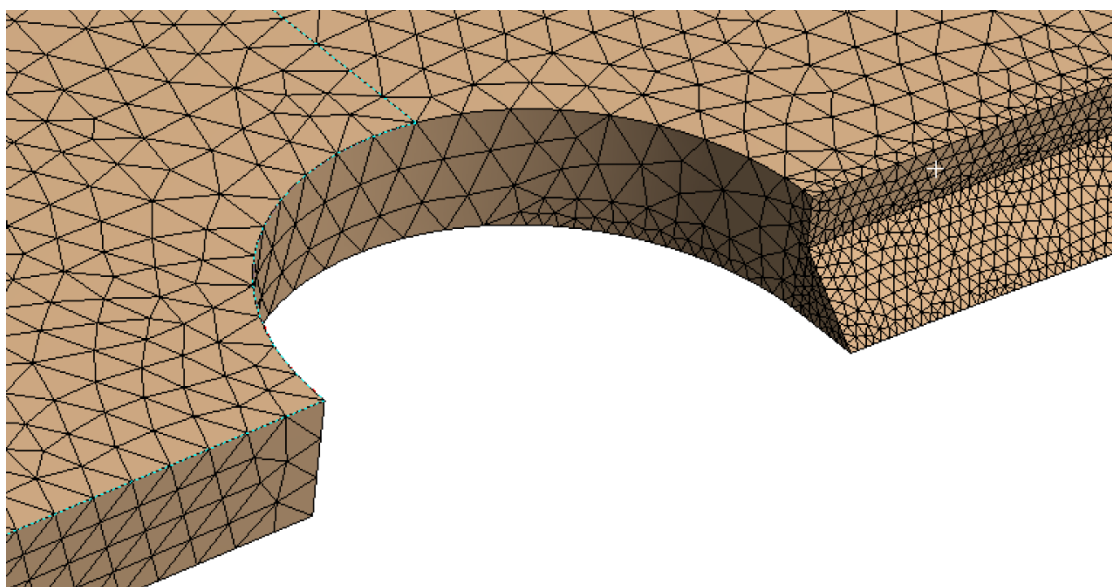
- modul pružnosti v tahu:  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa},$
- poissonovo číslo:  $\mu = 0,3.$

### 4.3.2 Konečno-prvková struktura

Konečno-prvková struktura byla vytvořena na základě stejných postupů jako v předchozím případě.



Obrázek 4.10 – Návrh č. 1: Konečno-prvkový model



Obrázek 4.11 – Návrh č.1: Detail konečno-prvkového modelu

### 4.3.3 Okrajové podmínky

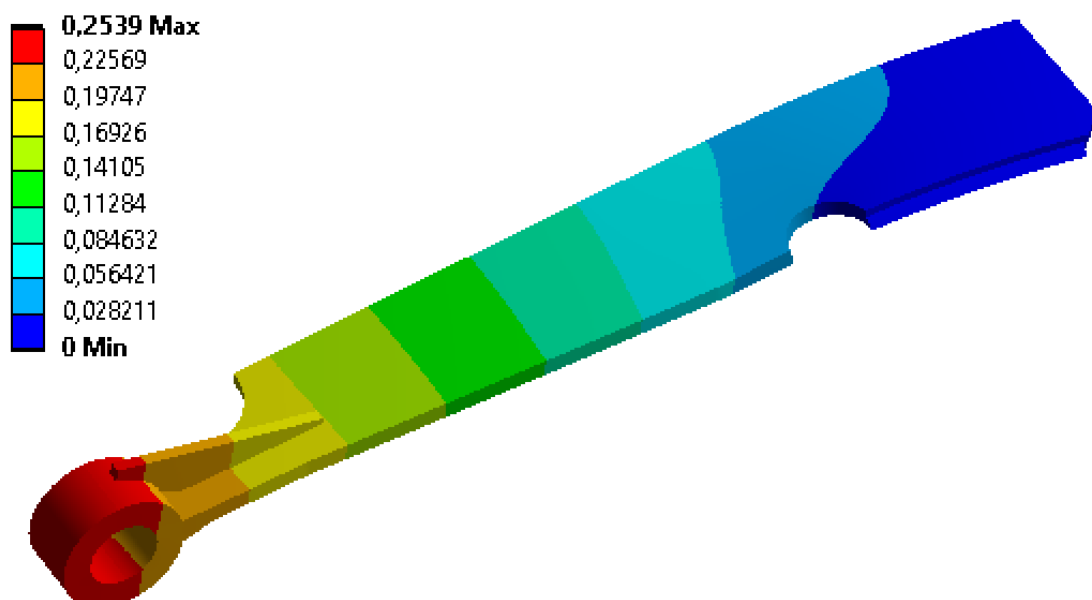
Okrajové podmínky byly nastaveny identicky jako ve výpočtu původního pera.



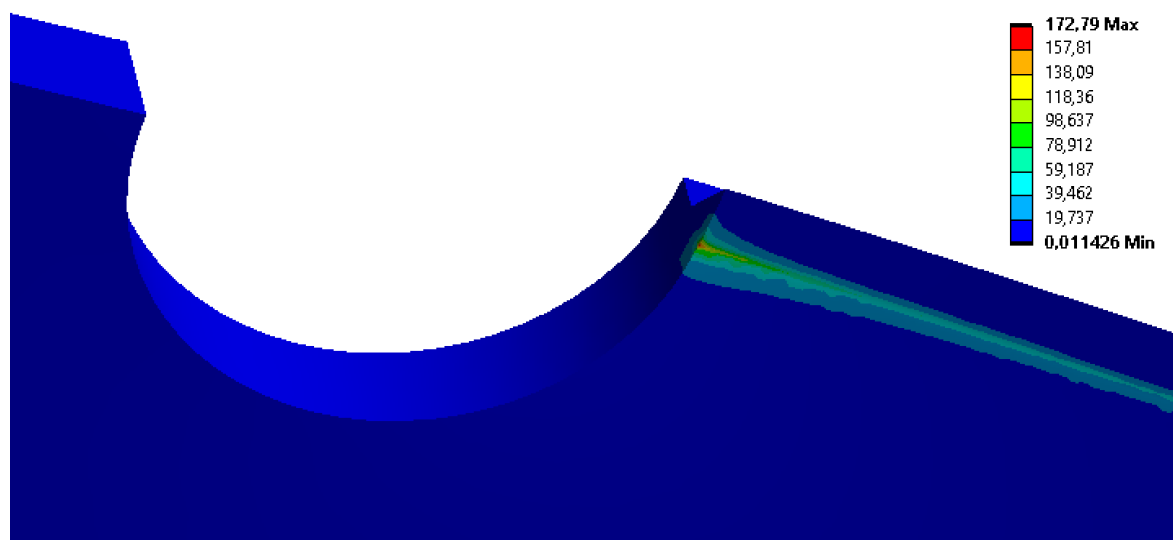
Obrázek 4.12 – Návrh č.1: Okrajové podmínky

#### 4.3.4 Výsledky konečno-prvkové analýzy

Jak již bylo zmíněno na minulých stránkách, bylo potřeba přerušit či rozložit silový tok. Za tímto účelem byla v peru vytvořena kruhová výseč splývající s čelem svaru. To mělo za následek snížení redukovaného napětí přibližně o 80 MPa. Na druhou stranu kruhová výseč částečně snížila tuhost pera, a tudíž došlo k malému nárustu posunutí.

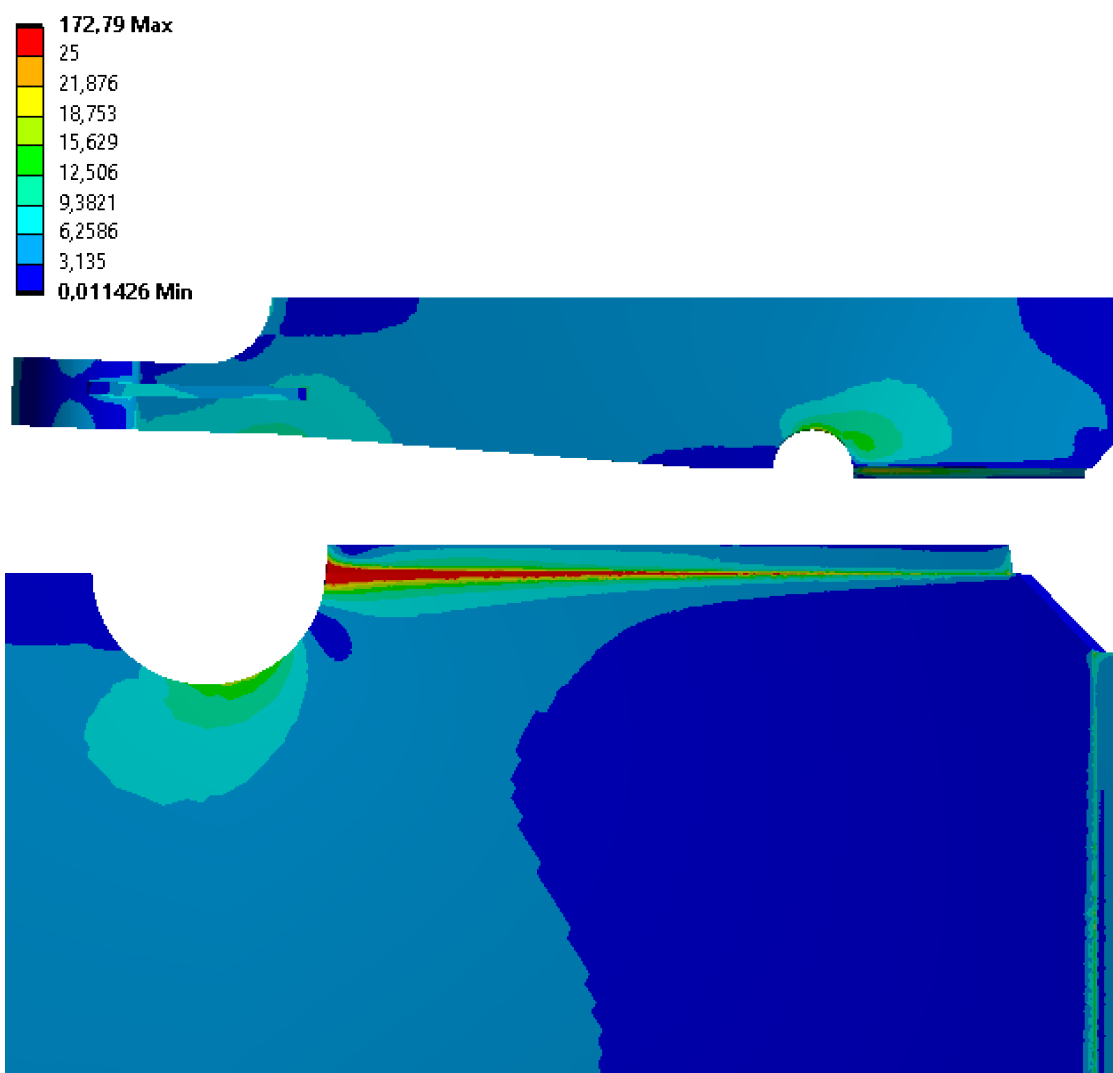


Obrázek 4.13 – Návrh č. 1: Celkové posunutí [mm]



Obrázek 4.14 – Návrh č.1: Redukované napětí [MPa]

Pro přehlednější zobrazení výsledků byla opět použita nelineární stupnice redukovaného napětí.



Obrázek 4.15 – Návrh č.1: Redukované napětí s nelineární stupnicí [MPa]

Z výsledků je tedy patrné, že výseč pomohla rozložit silový tok a bylo dosaženo požadovaného snížení redukovaného napětí. Ovšem z rozložení napětí je vidět, že silový tok se přenáší zejména prostřednictvím začátku svaru u kruhové výseče. Svar na zadní straně pera silový tok téměř nepřenáší.

## 4.4 Návrh nové konstrukce pera č. 2

Předchozím výpočtem bylo prokázáno, že rozložení silového toku razantně sníží napětí. Ovšem konstrukce svaru nenaplní její potenciál v přenosu sil. Silový tok stále „naráží“ do čela svaru, kde se koncentruje, a svar na zadní straně silový tok téměř nepřenáší. Proto byla navržena nová geometrie, ve které se zcela odstranily podélné i příčné svary na peru. Namísto nich byl v peru vytvořen kruhový otvor o průměru 215 mm a svar byl umístěn po jeho obvodu. To by mělo způsobit pravidelné rozložení silového toku do svaru po mnohem větší délce, než tomu bylo doposud, a zamezení vzniku jakéhokoliv vrubu.



Obrázek 4.16 – Návrh č.2: Geometrie

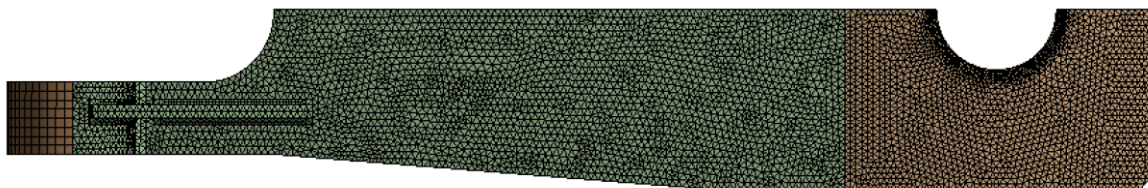
### 4.4.1 Materiálové parametry

Parametry byly opět shodné s předchozími simulacemi.

- Modul pružnosti v tahu:  $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$
- Poissonovo číslo:  $\mu = 0,3$

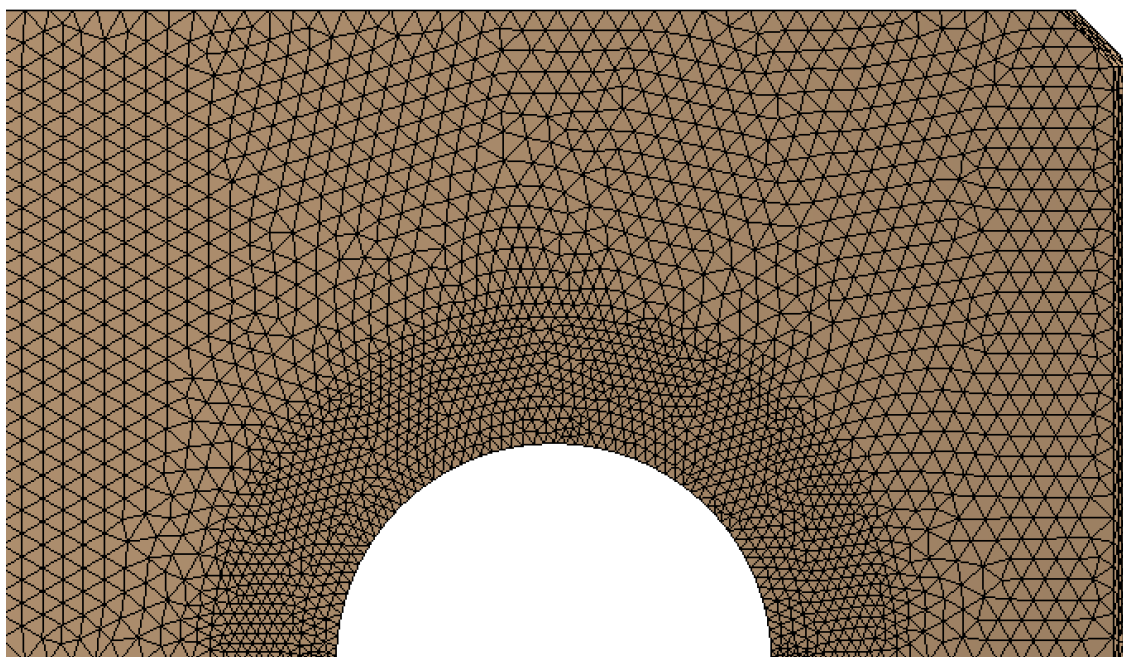
### 4.4.2 Konečno-prvková struktura

V tomto případě, při tvorbě konečno-prvkové sítě, bylo důležité její zjemnění v okolí svaru, a tedy i otvoru v peru.



Obrázek 4.17 – Návrh č.2: Konečno-prvkový model





Obrázek 4.18 – Návrh č.2: Spodní strana konečno-prvkového modelu

#### 4.4.3 Okrajové podmínky

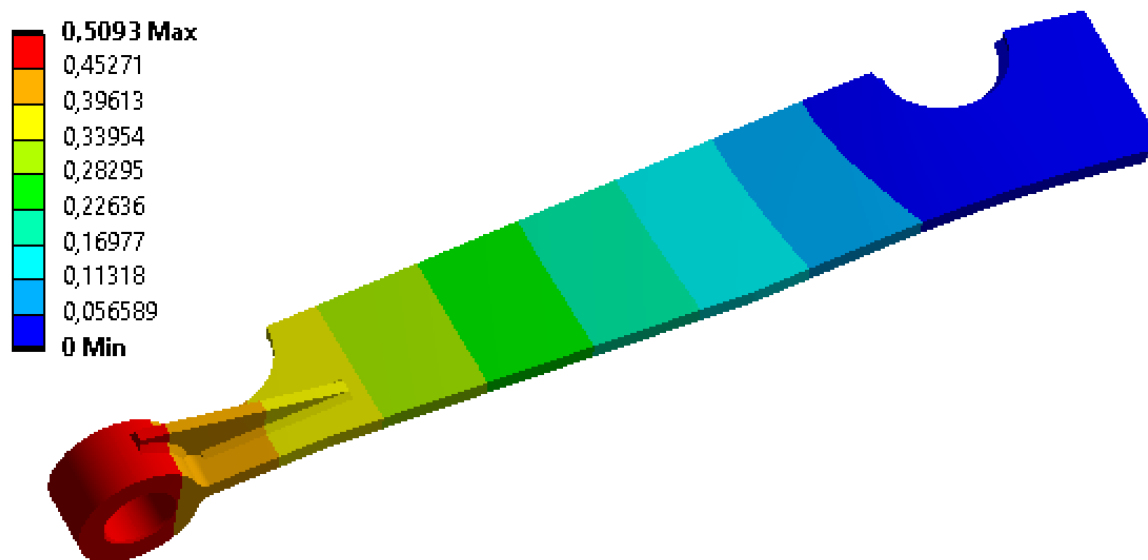
Okrajové podmínky byly nastaveny obdobně jako v předchozích případech.



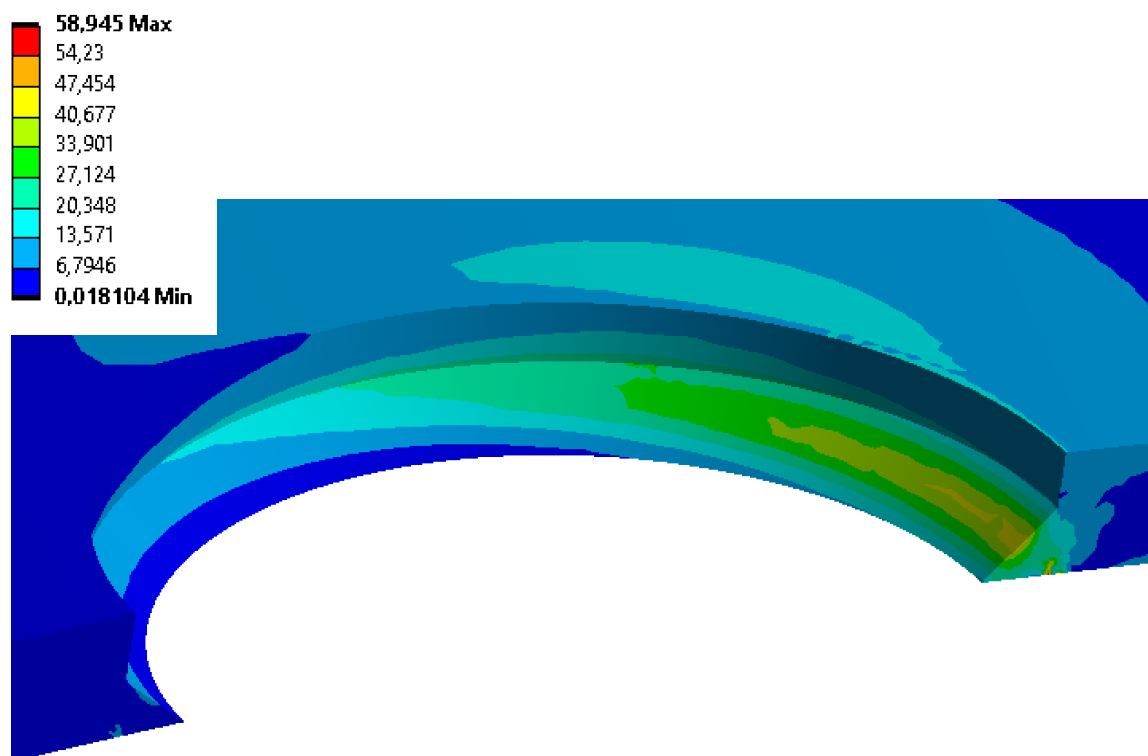
Obrázek 4.19 – Návrh č.2: Okrajové podmínky

#### 4.4.4 Výsledky konečno-prvkové analýzy

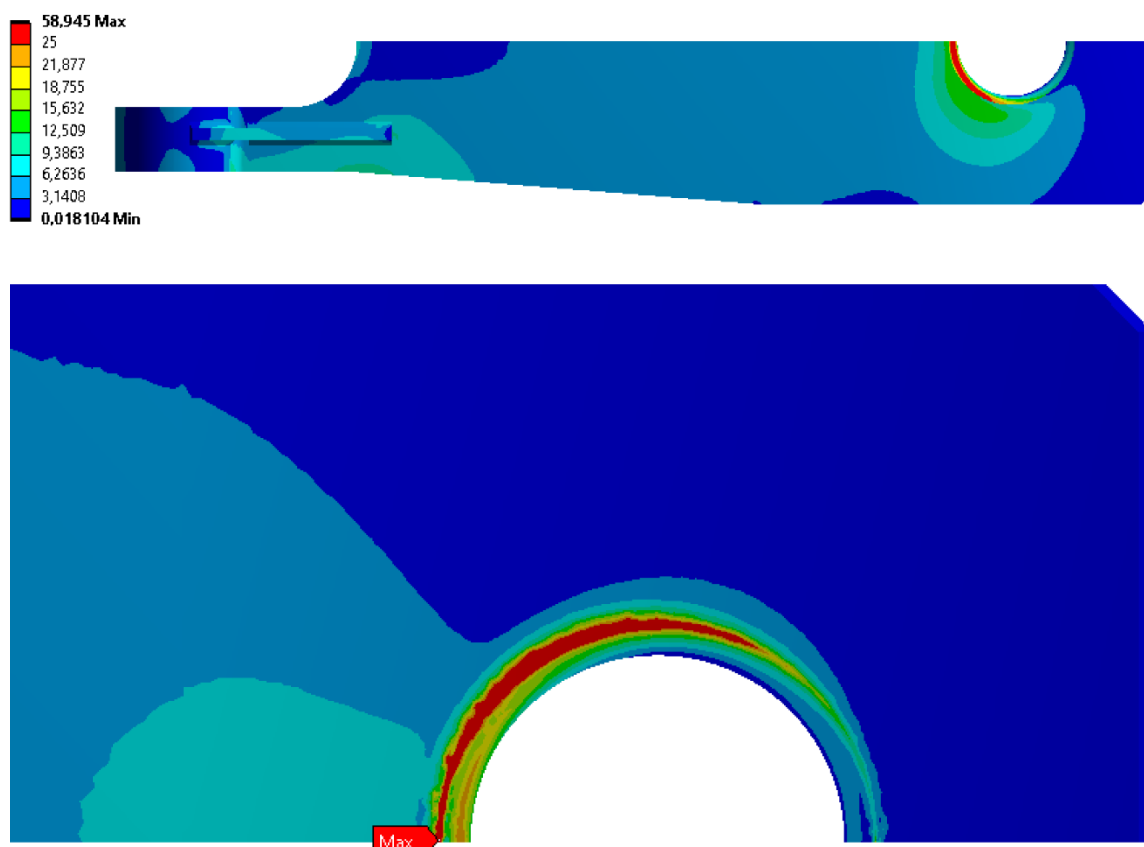
Z výsledků je zřejmé, že toto řešení dalece překonalo obě předchozí varianty. Silový tok v tomto případě „nenaráží“ do čela svaru, ale rozloží se rovnoměrně na obvod svaru. Díky tomu došlo ke snížení redukovaného napětí přibližně o 200 MPa oproti původnímu řešení a o 110 MPa oproti návrhu č. 1. Otvor způsobuje snížení tuhosti pera, tudíž došlo i ke zvětšení posunutí, jehož hodnota je však zanedbatelná.



Obrázek 4.20 – Návrh č.2: Celkové posunutí [mm]



Obrázek 4.21 – Návrh č. 2: Redukované napětí [MPa]



Obrázek 4.22 – Návrh č.2: Redukované napětí s nelineární stupnicí [MPa]

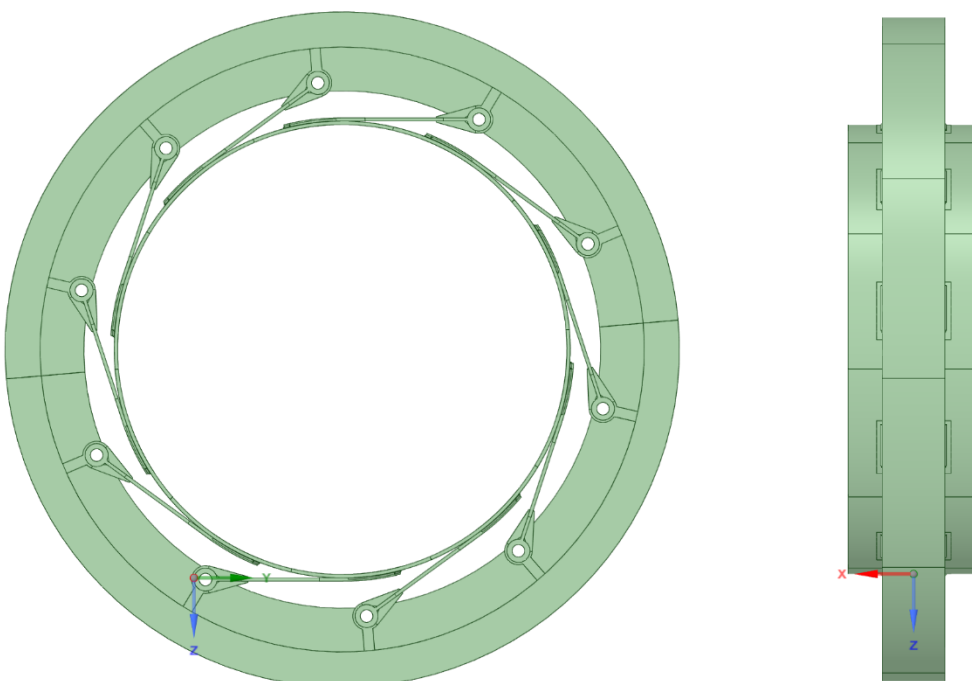
Tato konstrukce pera se osvědčila jako nejlepší varianta a bude dále použita pro analýzu reálného zatížení. Z výsledků je patrné, že toto řešení razantně sníží napětí a mohlo by zajistit, že nebude docházet k únavovému poškození. Na obrázku výše je vidět, že svar je zatěžován spojitě a nevzniká zde místo s vrubem.

## 5. Analýza pohonu sušicího bubnu

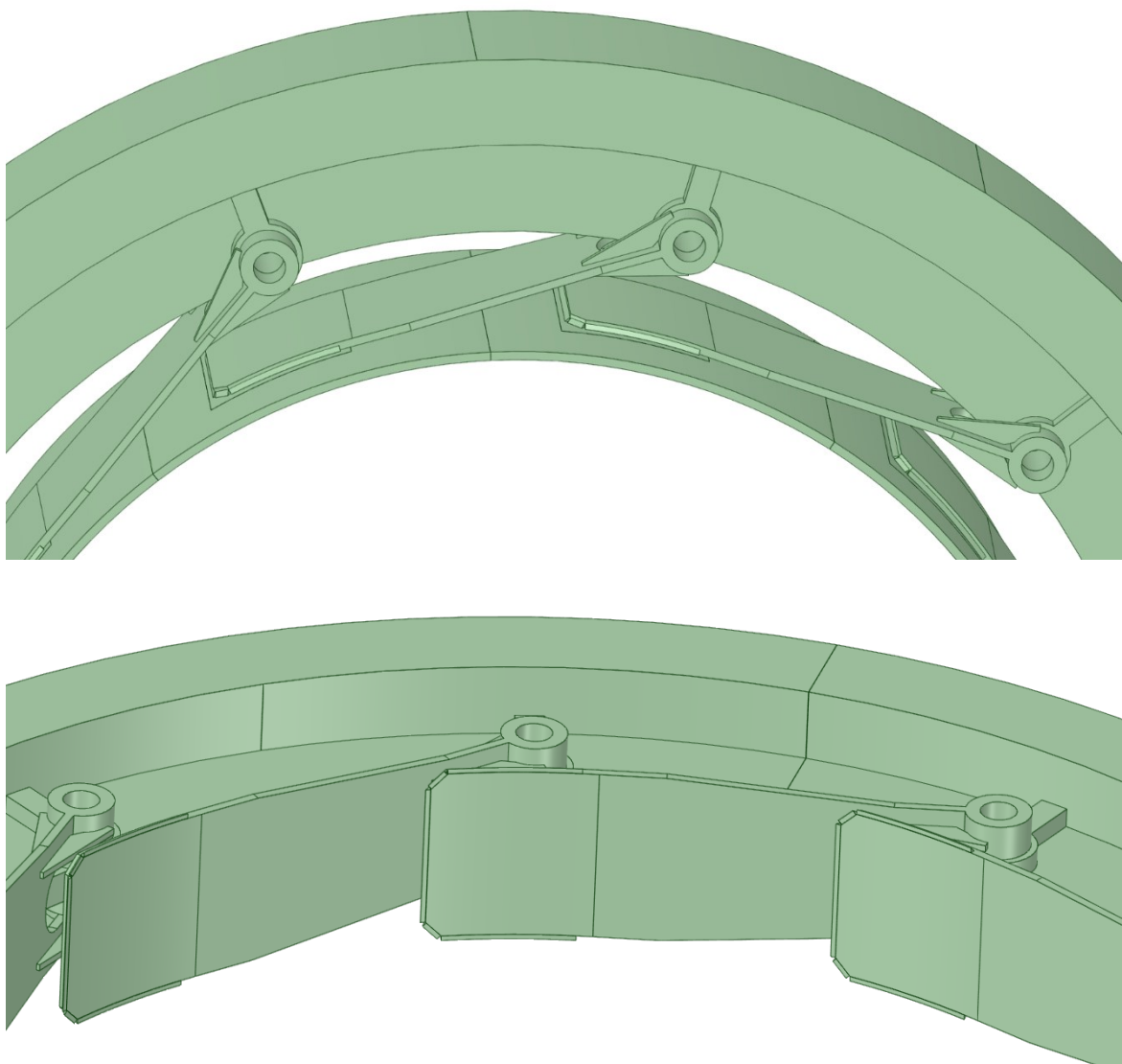
V předchozí kapitole byly simulovány podmínky, které sloužily k porozumění a analýze problematiky a k návrhu nového připojení pera, která zajistí snížení a spojité rozložení napětí. V této kapitole bude provedena analýza připojení per s reálným provozním zatížením. To si žádá, aby byla simulace provedena na sestavě pohonu, jelikož provozní zatížení, jež je známo, má podobu radiální a tangenciální síly, která působí na ozubený věnec od převodového systému. Simulace bude provedena ve dvou variantách. První varianta představuje sestavu s původní konstrukcí pera a druhá varianta představuje sestavu s nově navrženou konstrukcí pera č. 2.

### 5.1 Analýza pohonu s původní konstrukcí per

S využitím výkresové dokumentace a předchozích modelů byla vytvořena geometrie pohonu opět v prostředí programu SpaceClaim. Vzhledem k velkým rozměrům v souvislosti s následnou tvorbou konečno-prvkové struktury bylo nutné vytvořit geometrii pohonu částečně zjednodušenou, avšak pouze do té míry, aby nebyly zásadně ovlivněny výsledky simulace. V modelu se tedy nevyskytují žádná sražení, zaoblení či ozubení. I přes všechna zjednodušení si model ozubeného věnce zachoval své hmotové parametry, které jsou potřebné pro nastavení zatížení vlastní tíhou.



Obrázek 5.1 – Pohon s původními pery: Geometrie



Obrázek 5.2 – Pohon s původními pery: Detail geometrie

Pro simulaci je nutné správné nastavení značného množství kontaktů. Problematická oblast je rovina symetrie, jelikož by v ní figurovalo několik kontaktů, které podmínka symetrie musí nejen přenést na imaginární část geometrie, ale zároveň zahrnout v rovině symetrie. Z tohoto důvodu byla geometrie vytvořena v celém svém rozsahu a v simulaci tedy nebude využito nastavení symetrie.

Nevyužití symetrie s sebou nese i negativní dopad na simulaci, a to z kvantitativního hlediska konečno-prvkové struktury. S vyšším množstvím elementů a uzlů simulace je náročnější a trvá delší dobu. V tomto případě bude v simulaci figurovat dvakrát více elementů než v případě s využitím symetrie a požadavky na hardware se značně zvýší.

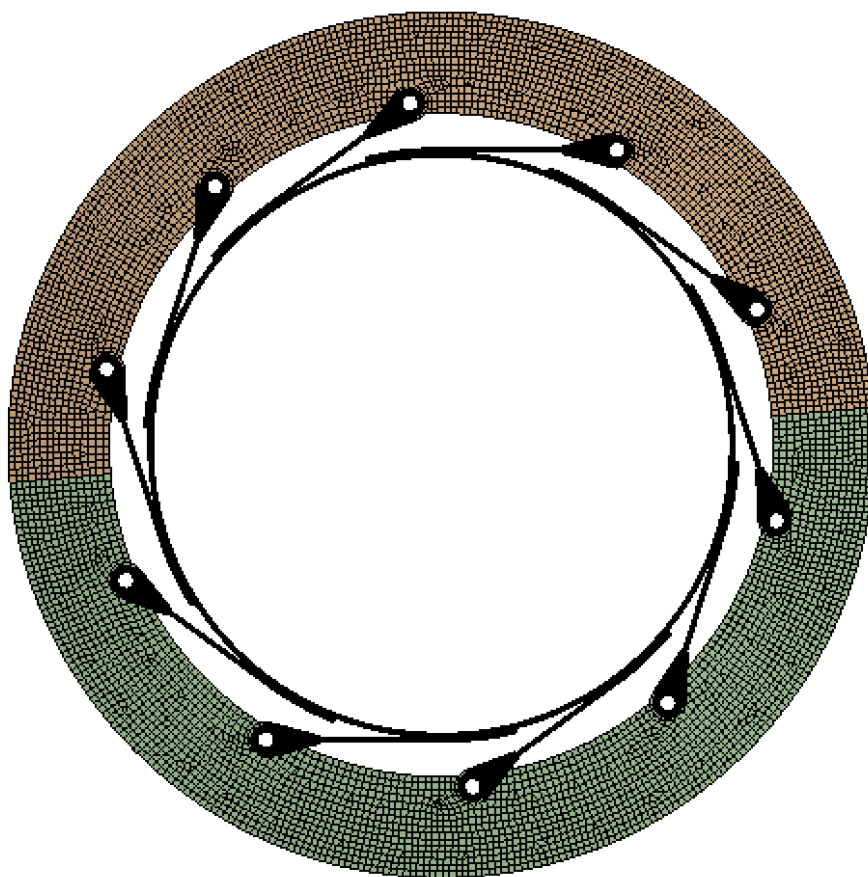
### 5.1.1 Materiálové parametry

Parametry byly opět shodné s předchozími simulacemi.

- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| • Modul pružnosti v tahu:          | $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$             |
| • Poissonovo číslo:                | $\mu = 0,3$                                  |
| • Minimální hodnota meze kluzu:    | $R_e = 250 \text{ MPa}$                      |
| • Minimální hodnota meze pevnosti: | $R_m = 360 \text{ MPa}$                      |
| • Hustota:                         | $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |

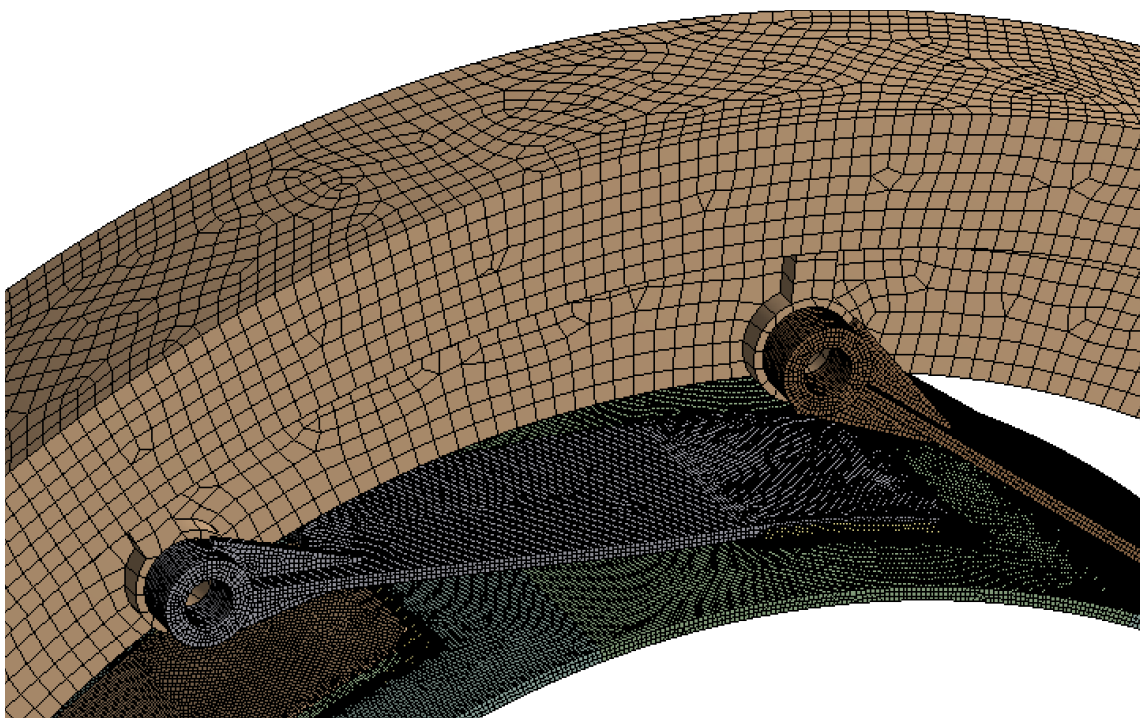
### 5.1.2 Konečno-prvková struktura

Pro simulaci je vytvoření konečno-prvkového modelu naprosto stěžejní. Jelikož v modelu není využito symetrie a je značně rozsáhlý, je nutné vytvořit konečno-prvkovou strukturu maximálně efektivně. Díky počátečnímu zjednodušení geometrie má drtivá většina elementů tvořící konečno-prvkovou strukturu tvar hexaedru. Další podstatné nastavení konečno-prvkové struktury je stejná velikost konečných prvků na svarech a části bubnu, na které svary leží, respektive tam, kde se nastavuje pevné kontaktní spojení mezi svarem a bubnem.

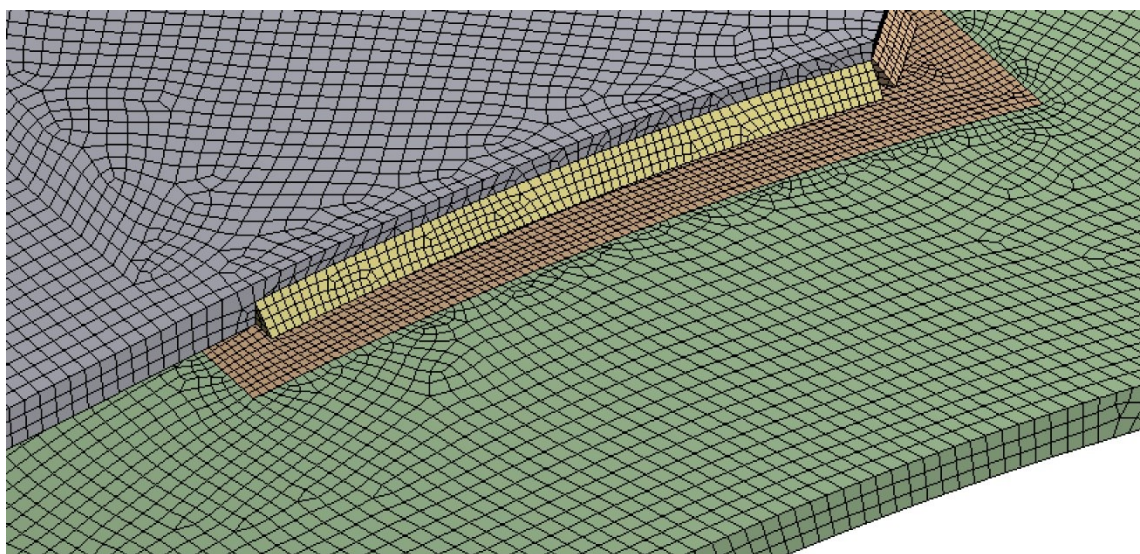


Obrázek 5.3 – Pohon s původními pery: Konečno-prvkový model





Obrázek 5.4 – Pohon s původními pery: Detail konečno-prvkového modelu



Obrázek 5.5 – Pohon s původními pery: Detail konečno-prvkového modelu

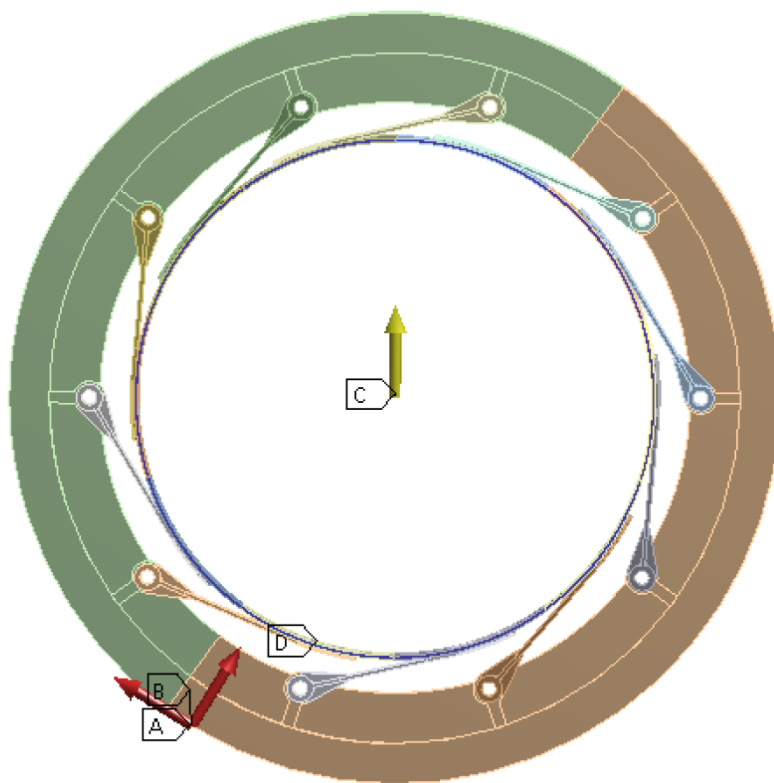
Konečno-prvková struktura vyobrazena na obrázcích výše se skládá z 2 213 522 elementů a 7 972 647 uzlů, což předpokládá, že simulaci nebude možné provést na standardním počítači či notebooku, ale bude potřeba stanice se silným hardwarovým zázemím.

### 5.1.3 Okrajové podmínky

Jak již bylo zmíněno, výpočet je rozdělen na dva zátěžové stavy, a to na zatížení pouze vlastní tíhou a na celkové provozní zatížení. Vzhledem k pomalým rychlostem otáčení sušicího bubnu byl výpočet nastaven jako statický. Ve výpočtech tedy budou zahrnuty tyto okrajové podmínky:

- pevné uchycení bubnu, které reprezentuje odpor bubnu při roztáčení,
- tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , které působí ve směru odchýleného od svislého směru o 2 %, čímž je simulováno naklopení sušicího bubnu,
- radiální síla v místě ozubeného převodu  $F_r = 52\,000 \text{ N}$ ,
- a tangenciální síla v místě ozubeného převodu  $F_t = 135\,500 \text{ N}$ .

- A** Force: 1,535e+005 N  
**B** Force 2: 52000 N  
**C** Acceleration: 9806, mm/s<sup>2</sup>  
**D** Fixed Support

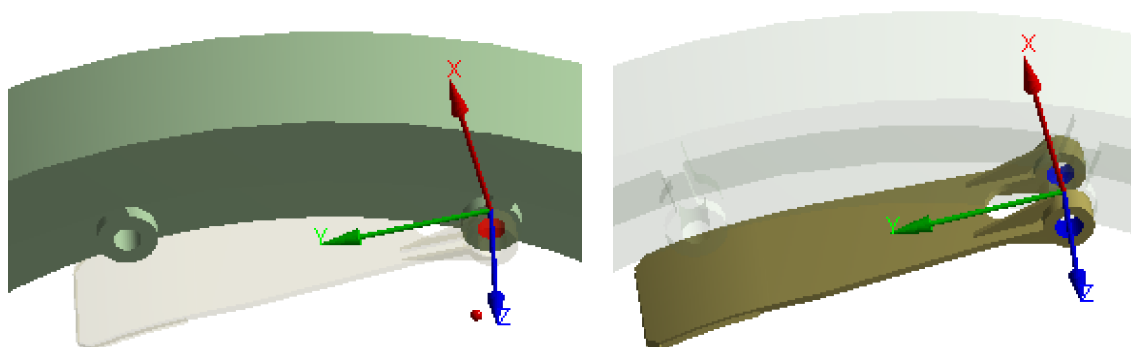


Obrázek 5.6 – Pohon s původními pery: Okrajové podmínky



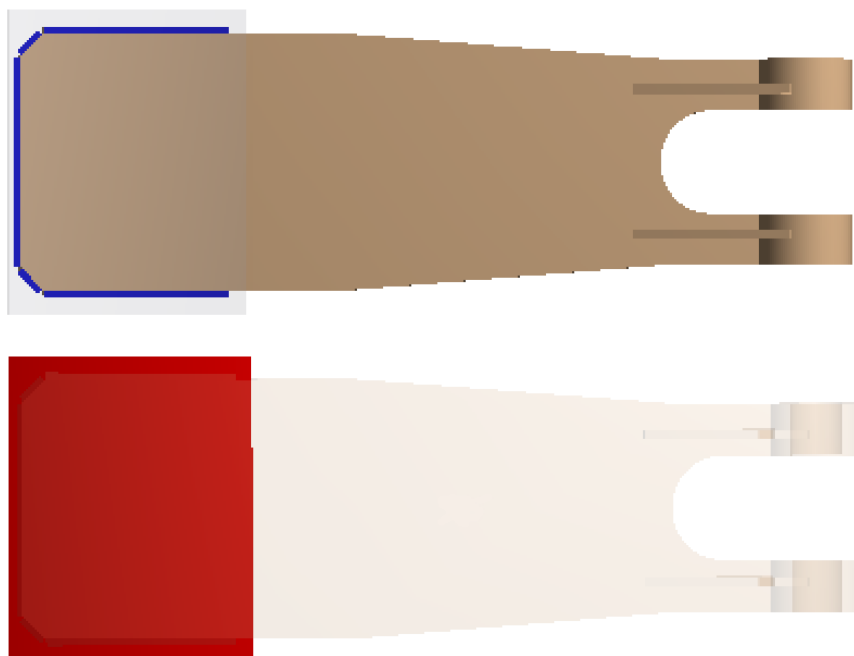
#### 5.1.4 Mechanické kontakty

Ve výpočtovém modelu bylo použito značné množství a několik druhů kontaktních spojení. Pro realizaci kloubového spojení ozubeného věnce a pera byl použit kontakt typu „Revolute joint“.



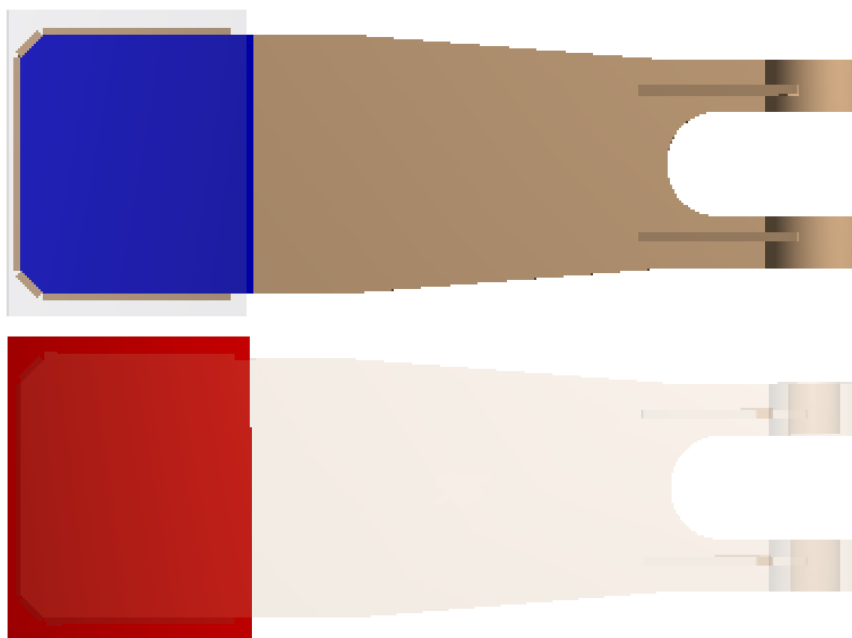
Obrázek 5.7 – Pohon s původními pery: „Revolute joint“ kontakt

Pevná spojení, která nedovolují prokluz, byla definována pomocí kontaktu typu „Bonded“. Tyto kontakty byly použity pro realizaci svarového spojení mezi perem a bubnem.



Obrázek 5.8 – Pohon s původními pery: „Bonded“ kontakt

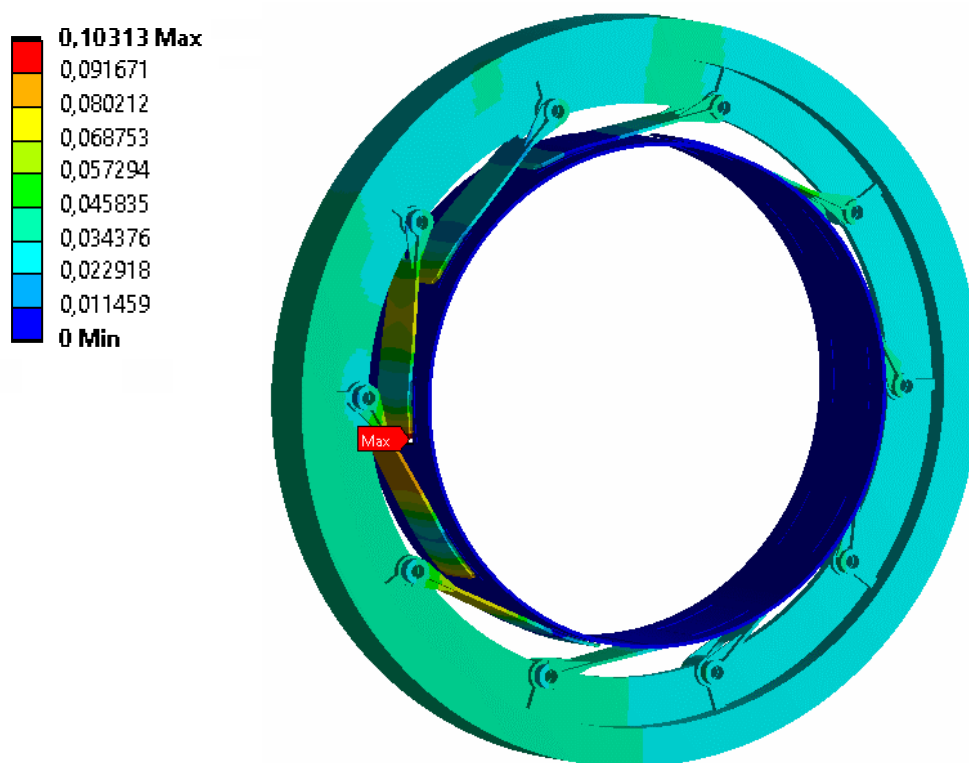
Třetí typ kontaktu použitý ve výpočtovém modelu byl kontakt typu „Frictionless“. Tento kontakt byl aplikován na styčnou plochu pera a bubnu. Tento kontakt je určitým zjednodušením výpočtu, jelikož ve skutečnosti mezi plochou pera a bubnu existuje tření, které rovněž podporuje spojovací funkci. Vzhledem k náročnosti úlohy toto tření bylo v modelu potlačeno.



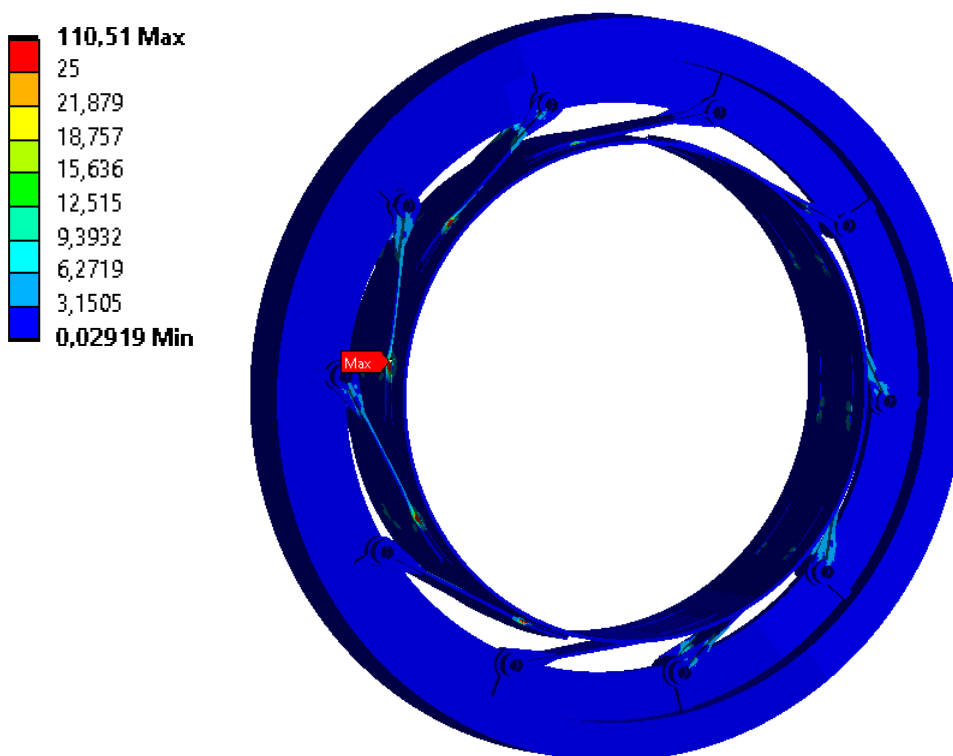
Obrázek 5.9 – Pohon s původními pery: „Frictionless“ kontakt

### 5.1.5 Výsledky konečno-prvkové simulace pro zatížení vlastní tíhou

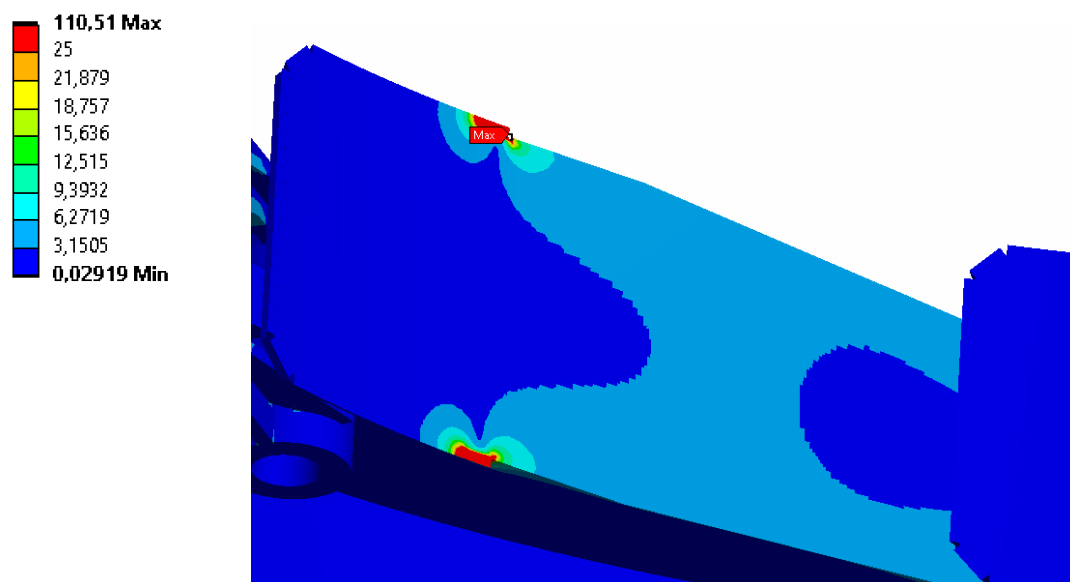
Jak bylo ověřeno v předchozí simulaci původního řešení, napětí se koncentruje na začátku svarů. Ostatní části svarů silový tok téměř nepřenáší.



Obrázek 5.10 – Pohon s původními pery: Celkové posunutí [mm]

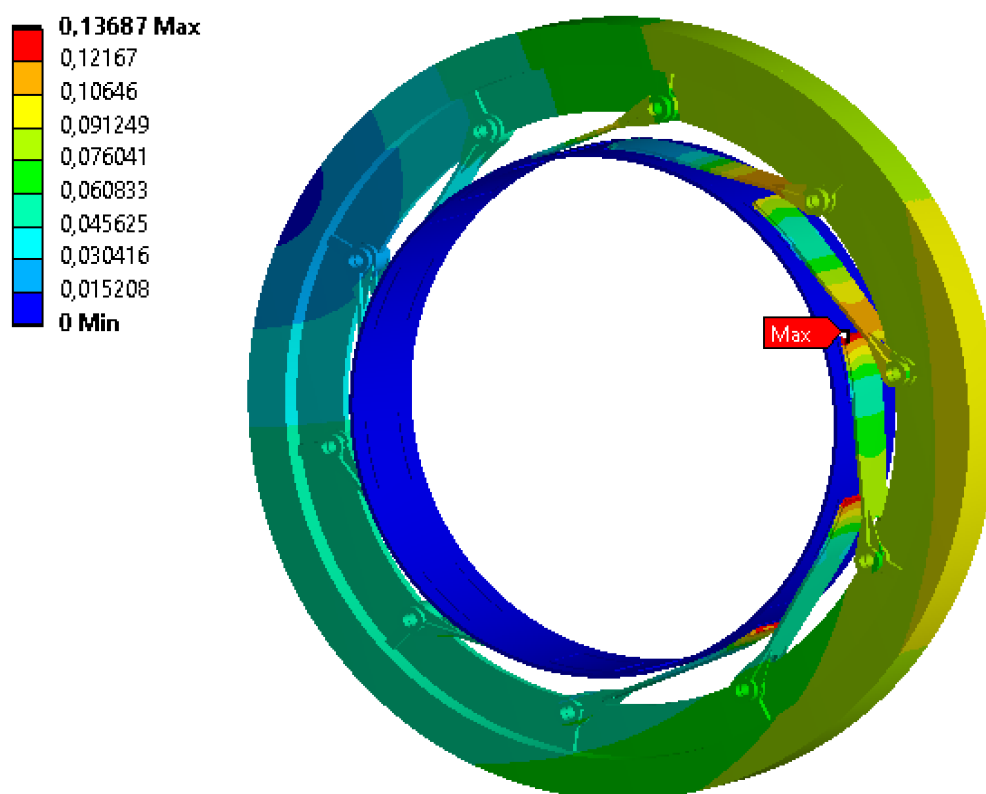


Obrázek 5.11 – Pohon s původními pery: Redukované napětí [MPa]

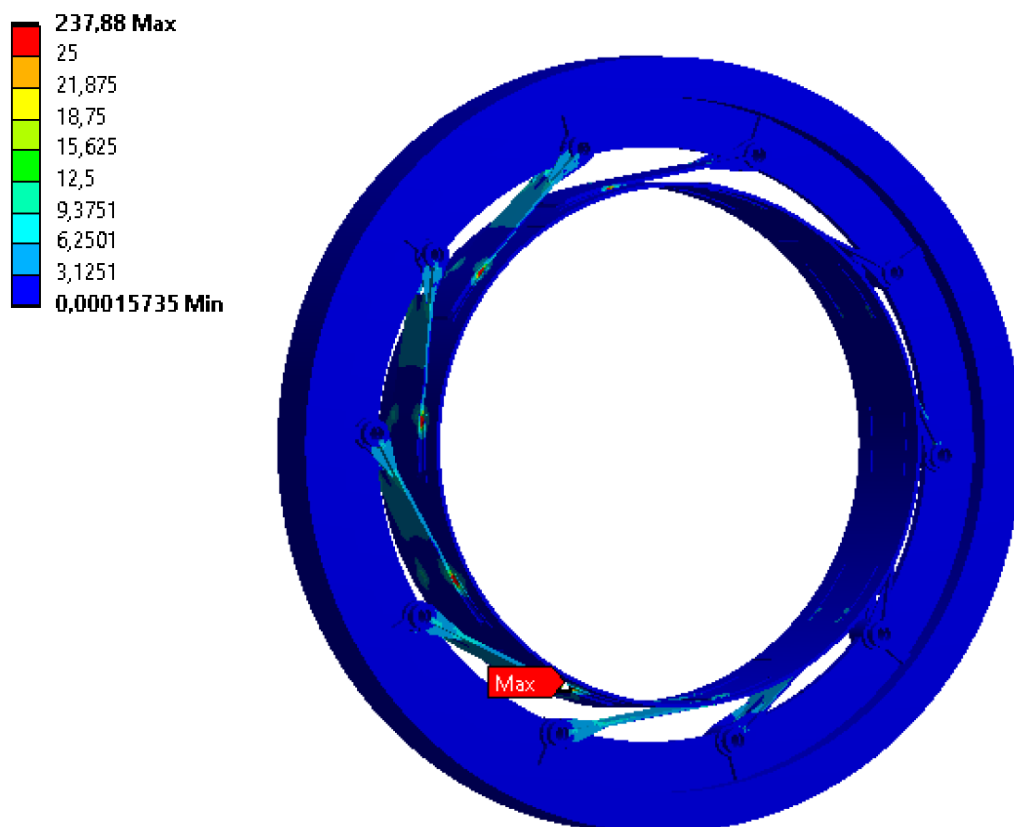


Obrázek 5.12 – Pohon s původními pery: Redukované napětí [MPa]

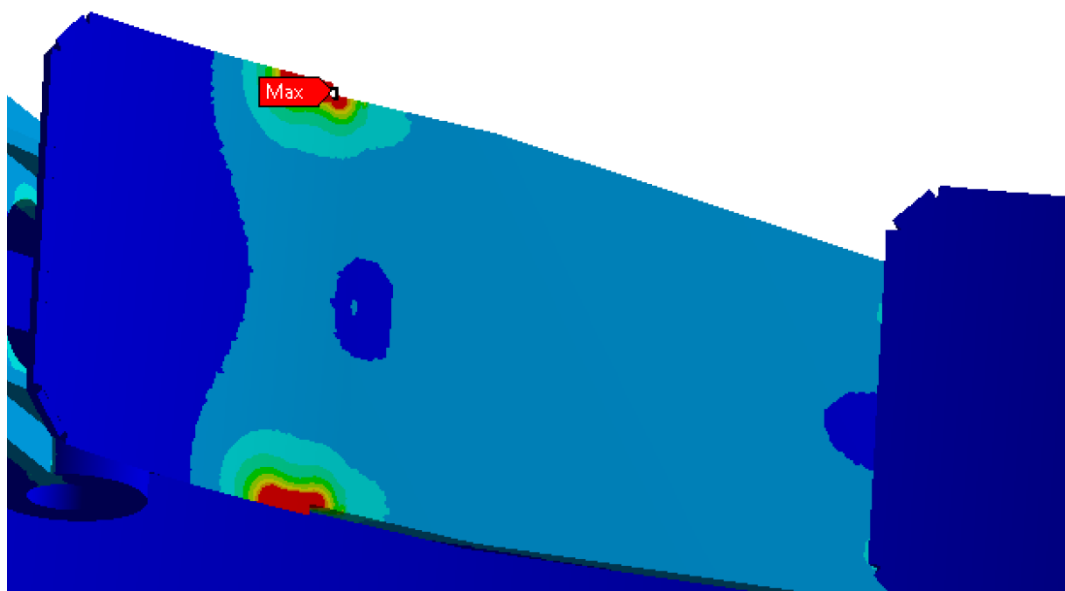
### 5.1.6 Výsledky konečno-prvkové simulace pro celkové zatížení



Obrázek 5.13 – Pohon s původními pery: Celkové posunutí [mm]



Obrázek 5.14 – Pohon s původními pery: Redukované napětí [MPa]



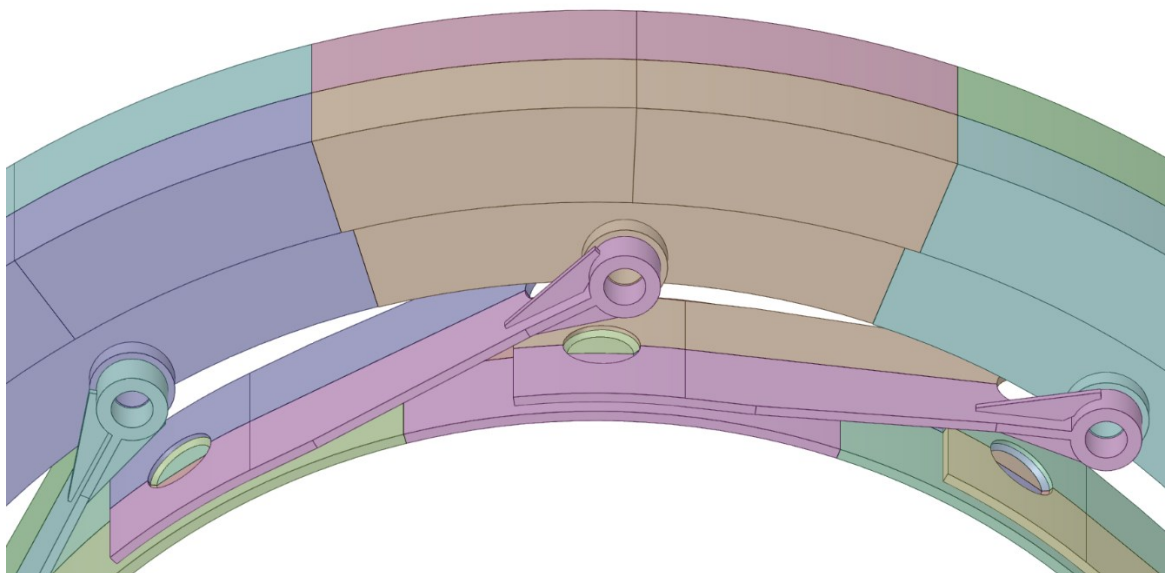
Obrázek 5.15 – Pohon s původními pery: Redukované napětí [MPa]

Z napětově deformačního stavu původní konstrukce pohonu je patrné, že při zatížení vlastní tíhou je maximální hodnota posunutí 0,103 mm a maximální hodnota redukovaného napětí je 111 MPa. Při celkovém zatížení maximální hodnota posunutí vzroste na 0,137 mm a maximální hodnota redukovaného napětí na 238 MPa. Toto maximum se vyskytuje

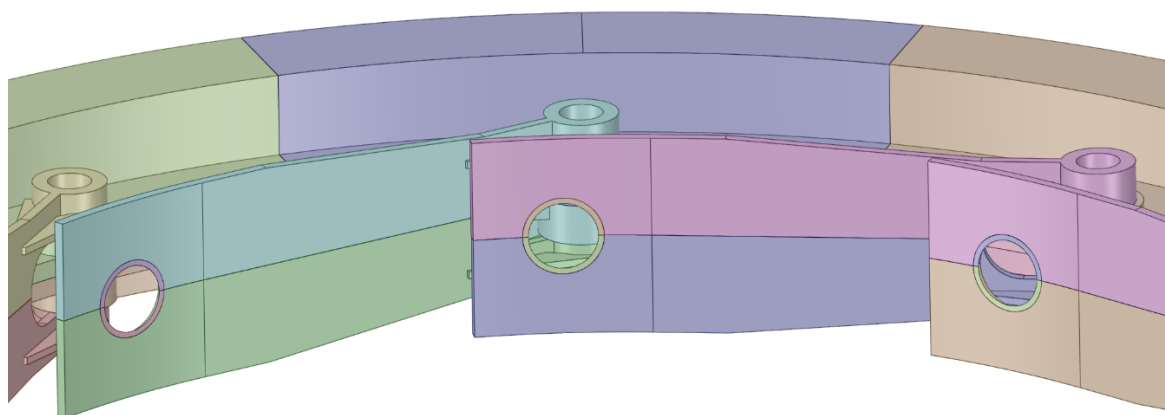
na prvním svaru v opačném směru od tangenciální síly. Jelikož se buben otáčí, dochází k cyklickému namáhání a jednotlivá maxima se cyklicky objevují na všech perech v sestavě pohonu. Maximální dosažená hodnota redukovaného napětí se značně blíží mezi kluzu, což potvrzuje, že během provozu bude docházet k únavovému poškození, což se na reálném díle skutečně stalo.

## 5.2 Analýza pohonu s navrženými pery č. 2

Po provedení analýzy pohonu původního řešení je možné pokračovat variantou s navrženými pery. Simulace jsou totožné, aby bylo možné daná řešení porovnat. Jediný rozdíl tkví v geometrii, a tedy místo deseti původních per se v sestavě nachází deset navržených per s kruhovým otvorem.



Obrázek 5.16 – Pohon s pery „Návrh č. 2“: Geometrie



Obrázek 5.17 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Geometrie

Vzhledem k náročnosti úlohy, která v přechodím případě na stanici s 16 jádry a 128 GB RAM paměti trvala přes 48 hodin, bylo provedeno několik dalších drobných zjednodušení, která vedla k jednodušší diskretizaci a tím dosažení nižšího počtu konečných prvků.

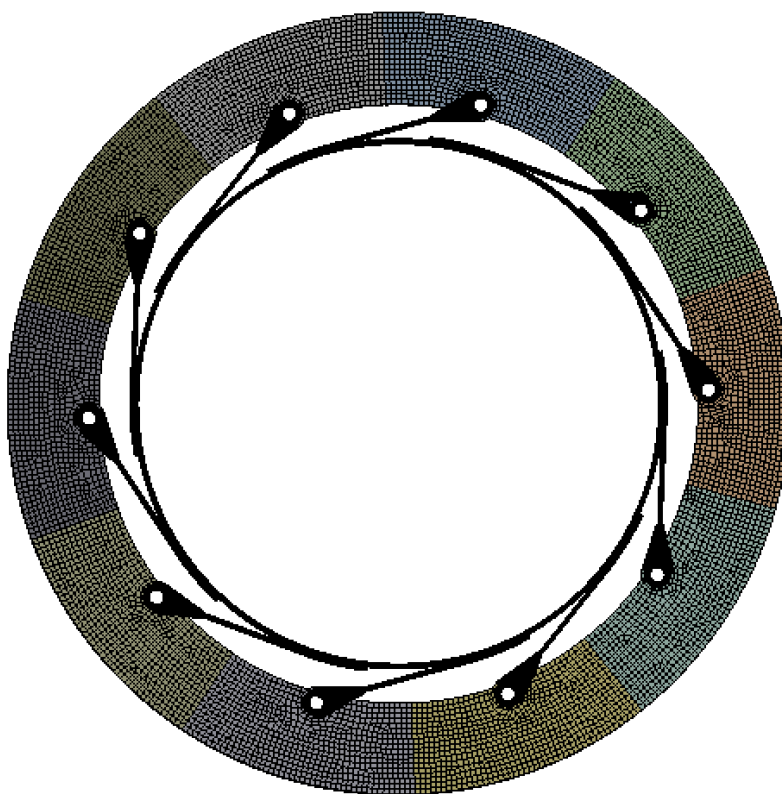
### 5.2.1 Materiálové parametry

Materiálové parametry jsou totožné jako v předchozí simulaci.

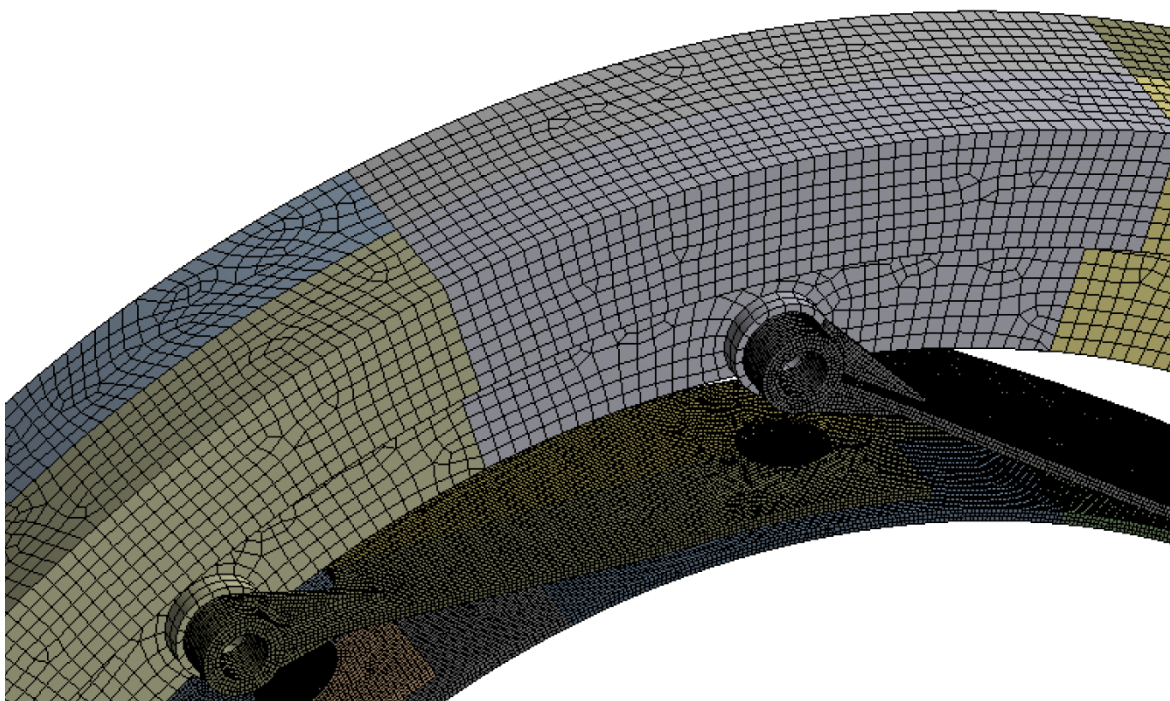
- |                                    |  |
|------------------------------------|--|
| • Modul pružnosti v tahu:          | $E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$             |
| • Poissonovo číslo:                | $\mu = 0,3$                                  |
| • Minimální hodnota meze kluzu:    | $R_e = 250 \text{ MPa}$                      |
| • Minimální hodnota meze pevnosti: | $R_m = 360 \text{ MPa}$                      |
| • Hustota:                         | $\rho = 7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ |

### 5.2.2 Konečno-prvková struktura

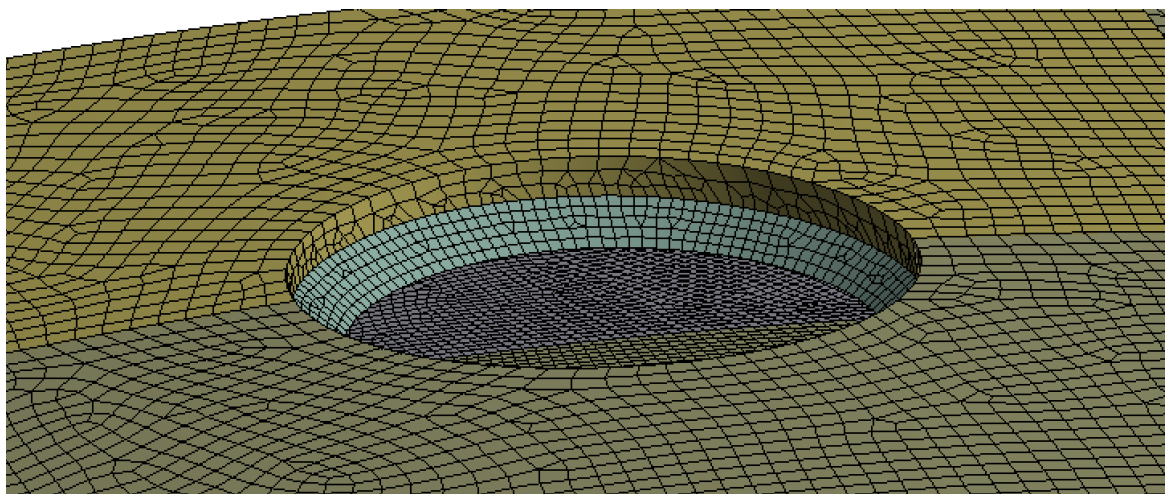
Postup při diskretizaci sestavy pohonu byl obdobný jako v předchozím případě. Oblast zájmu je opět u svaru, který je v tomto případě po obvodu otvoru. Hustší diskretizace byla provedena právě v okolí otvoru. Konečno-prvková struktura byla v tomto případě složena ze 1 171 463 elementů a 4 460 631 uzlů.



Obrázek 5.18 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Konečno-prvkový model



Obrázek 5.19 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Detail konečno-prvkového modelu



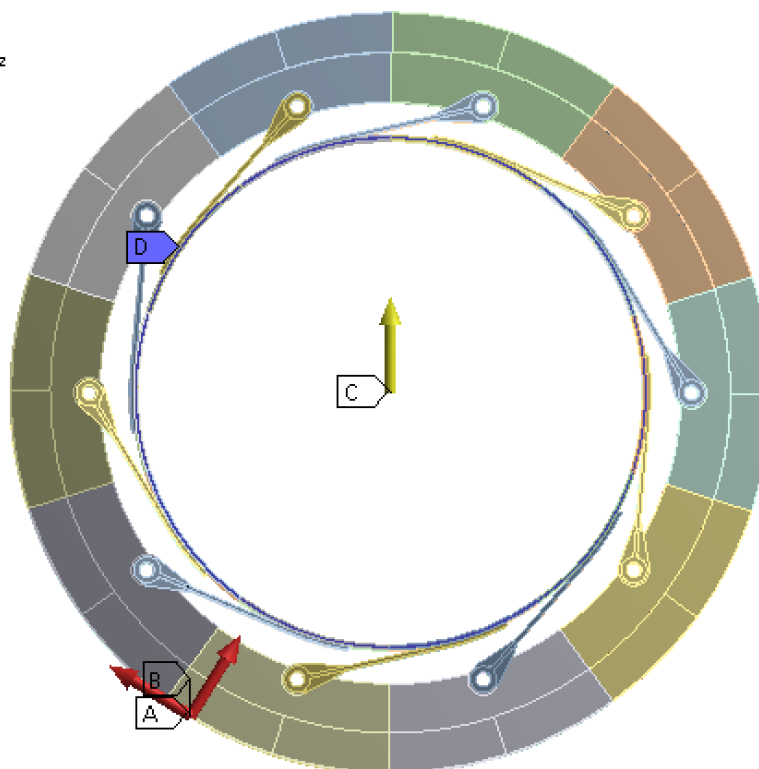
Obrázek 5.20 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Detail konečno-prvkového modelu

### 5.2.3 Okrajové podmínky

- Pevné uchycení bubnu, které reprezentuje odpor bubnu při roztáčení.
- Tíhové zrychlení  $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , které působí ve směru odchýleného od svislého směru o 2 %, čímž je simulováno naklopení sušicího bubnu.
- Radiální síla, která působí v místě ozubeného převodu,  $F_r = 52\,000 \text{ N}$ .
- Tangenciální síla, která působí v místě ozubeného převodu,  $F_t = 135\,500 \text{ N}$ .



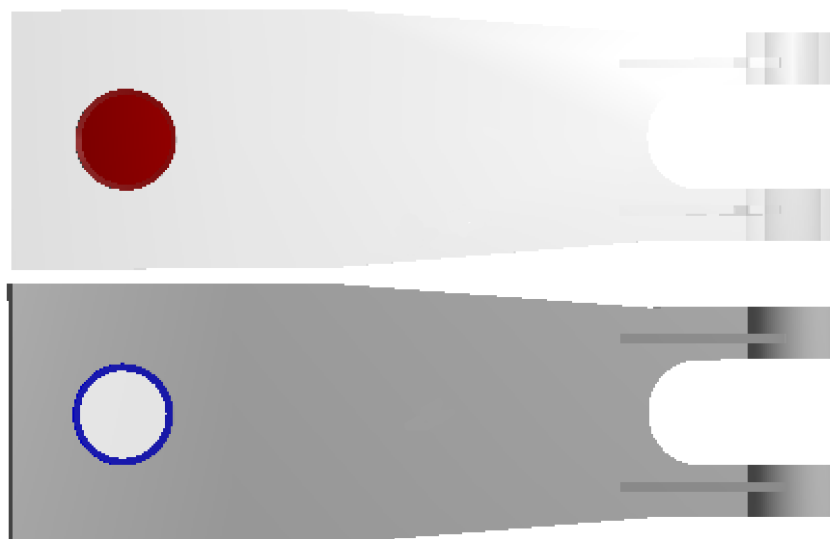
- A** Force: 1,535e+005 N
- B** Force 2: 52000 N
- C** Acceleration: 9806, mm/s<sup>2</sup>
- D** Fixed Support



Obrázek 5.21 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Okrajové podmínky

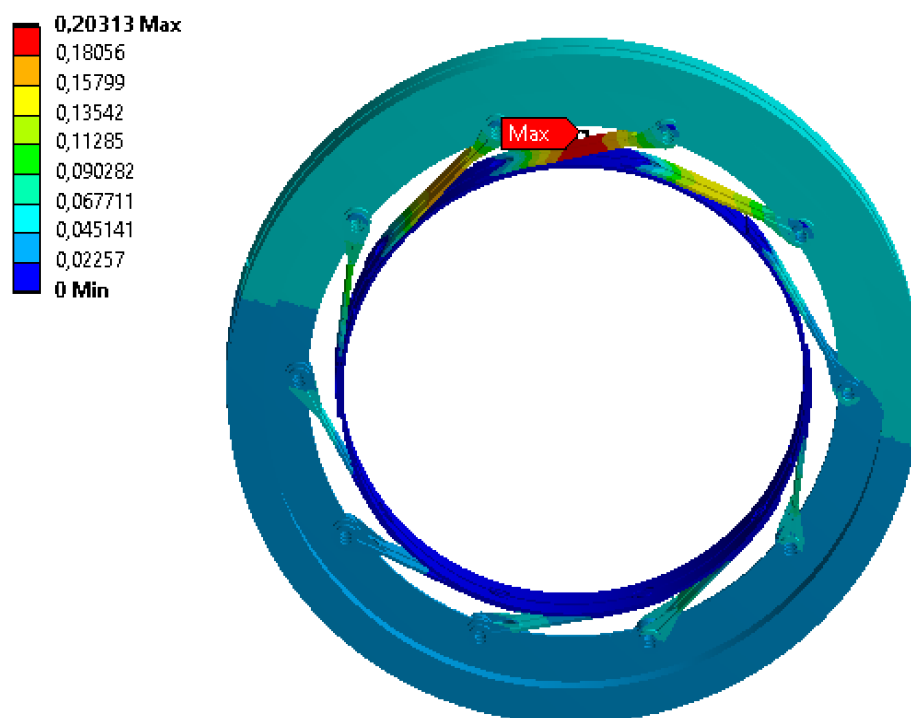
#### 5.2.4 Mechanické kontakty

V případě této simulace byly použity stejná kontaktní spojení jako ve variantě s původními pery. Jediný rozdíl byl tedy umístění a tvar svaru.

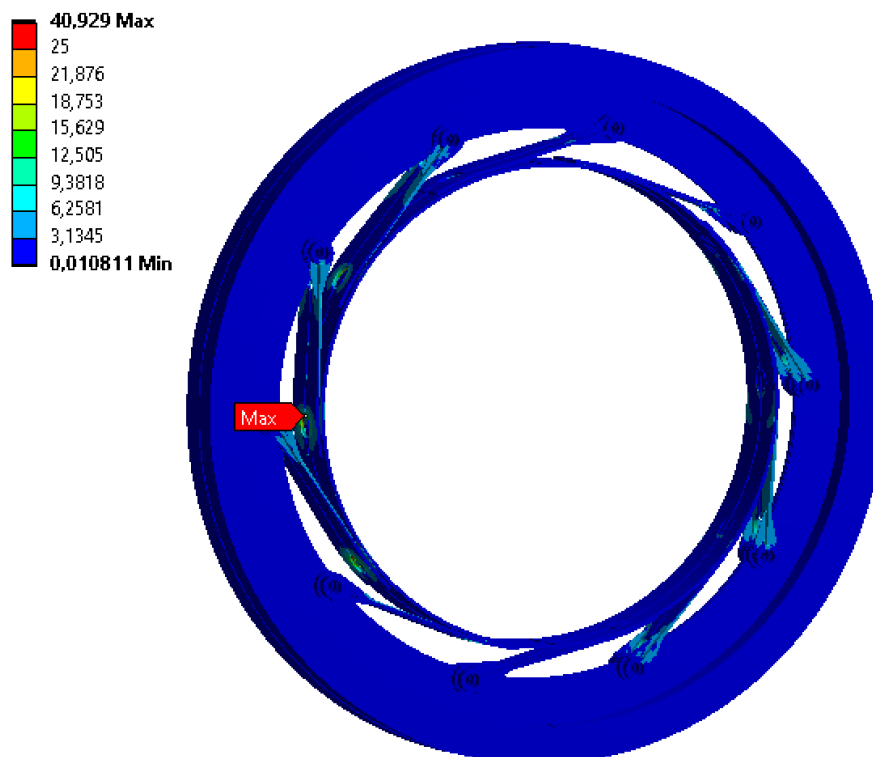


Obrázek 5.22 – Pohon s pery „Návrh č.2“: „Bonded“ kontakt

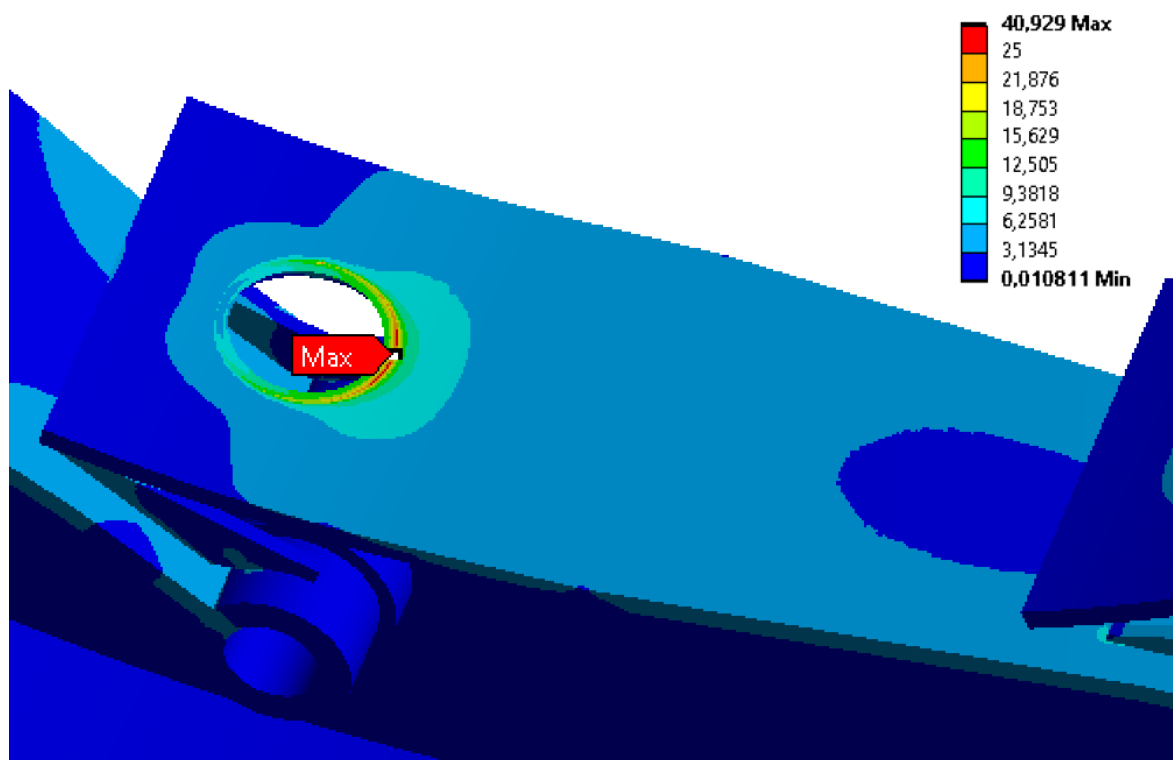
#### 5.2.4 Výsledky konečno-prvkové simulace pro zatížení vlastní tíhou



Obrázek 5.23 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Celkové posunutí [mm]



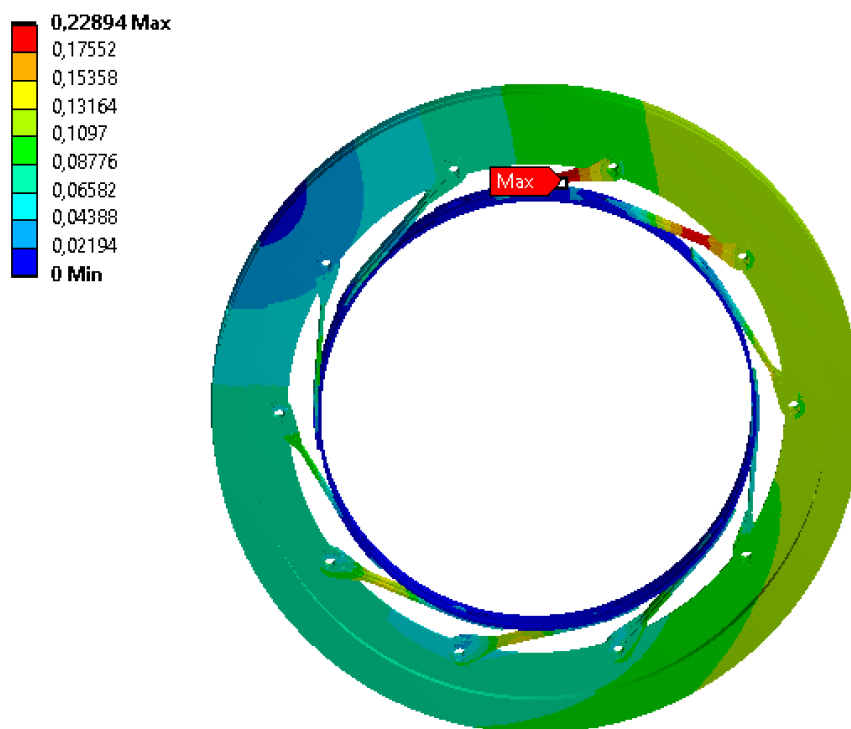
Obrázek 5.24 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Redukované napětí [MPa]



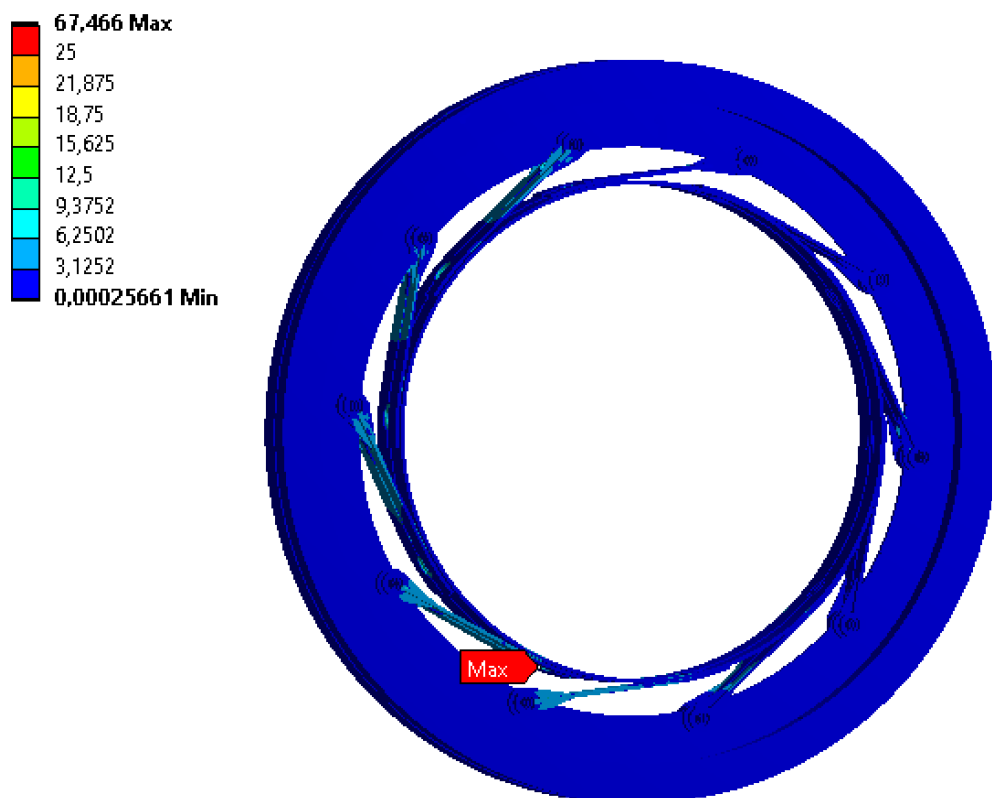
Obrázek 5.25 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Redukované napětí [MPa]

### 5.2.5 Výsledky konečno-prvkové simulace pro celkové zatížení

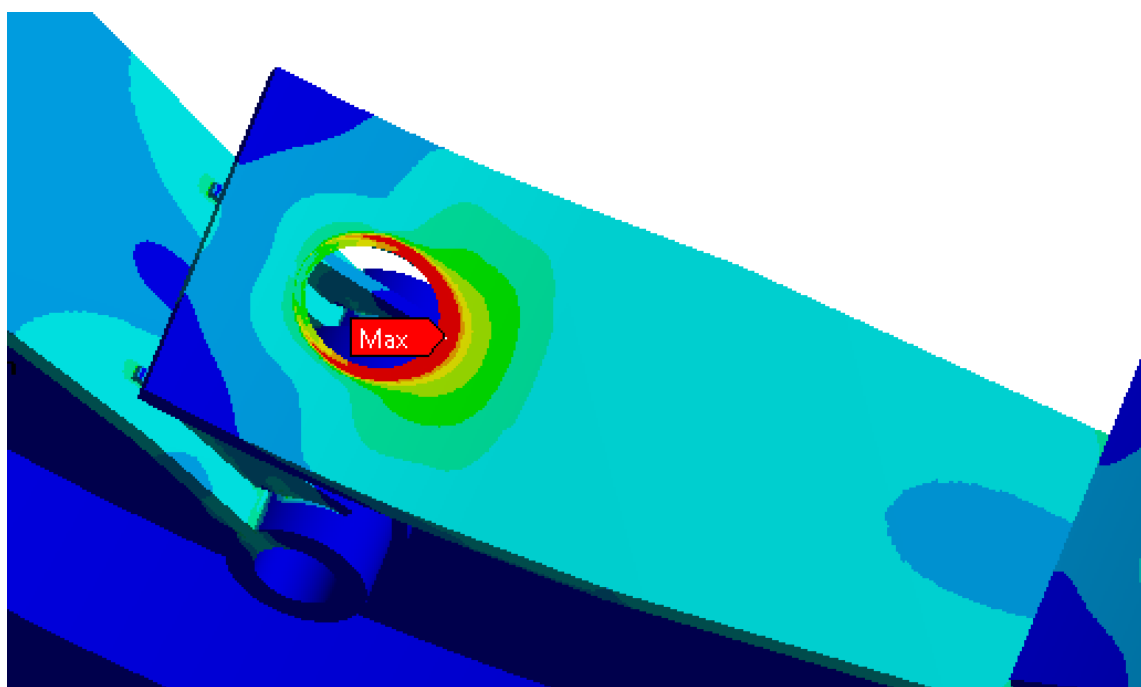
Maximum redukovaného napětí se vyskytuje na prvním svaru v opačném směru od tangenciální síly stejně jako v případě původní sestavy pohonu. V tomto případě ovšem maximum činí pouze 68 MPa oproti původním 237 MPa. Posunutí konstrukce se zvětšilo, avšak hodnoty se pohybují v rámci desetin mm, což je zanedbatelné u pětimetrové konstrukce.



Obrázek 5.26 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Celkové posunutí [mm]



Obrázek 5.27 – Pohón s pery „Návrh č.2“: Redukované napětí [MPa]

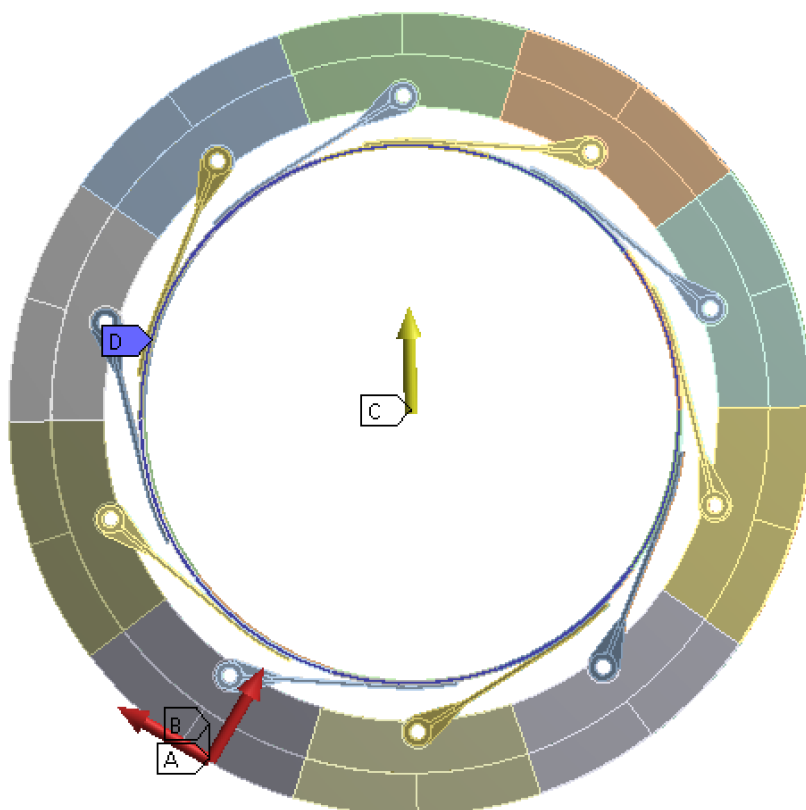


Obrázek 5.28 – Pohón s pery „Návrh č.2“: Redukované napětí [MPa]

### 5.3 Analýza pohonu s navrženými pery č. 2 s pootočením

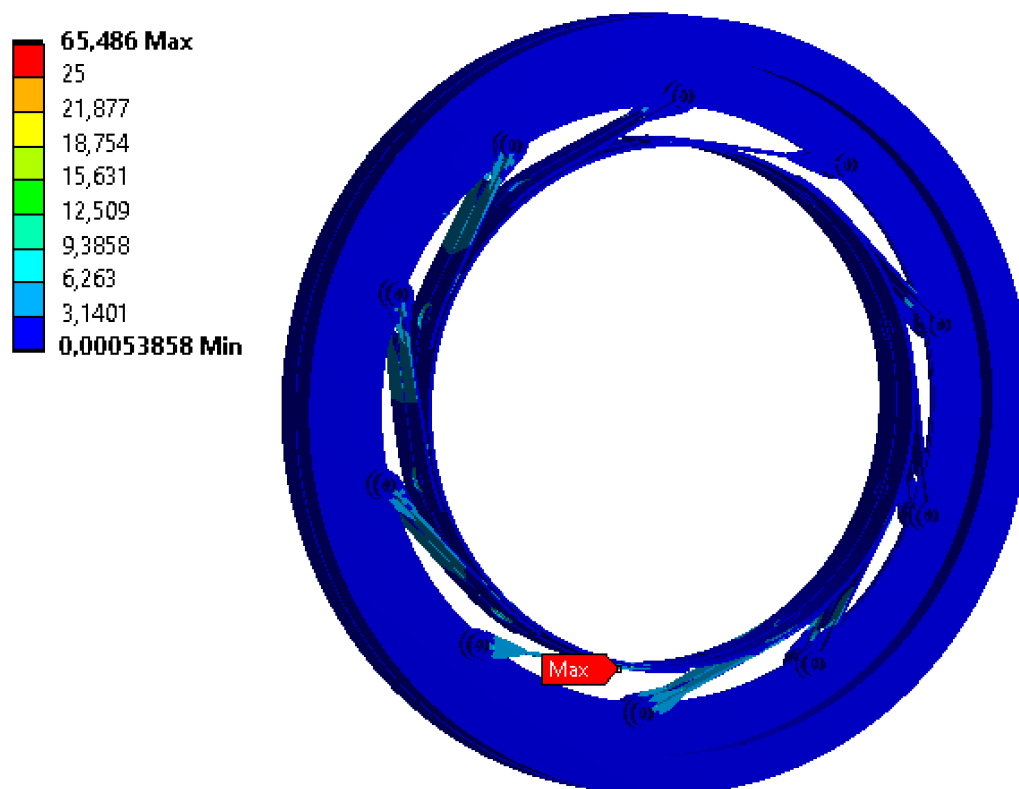
Mezi jednotlivými pery je na obvodu rozteč  $36^\circ$ . Zatížení od pohonu, tedy radiální a tangenciální síla, bylo aplikováno na věnec do místa uprostřed mezi klouby. V následující simulaci bylo zatížení posunuto o  $18^\circ$  nad kloub, aby bylo zjištěno, zda v této poloze nedochází k většímu zatížení sestavy. Simulace je naprosto totožná s předchozí simulací s odlišností v umístění okrajových podmínek, které jsou zobrazeny na obrázku níže.

- A** Force:  $1,535e+005$  N
- B** Force 2: 52000 N
- C** Acceleration: 9806, mm/s<sup>2</sup>
- D** Fixed Support



Obrázek 5.29 – Pootočený pohon s pery „Návrh č.2“: Okrajové podmínky

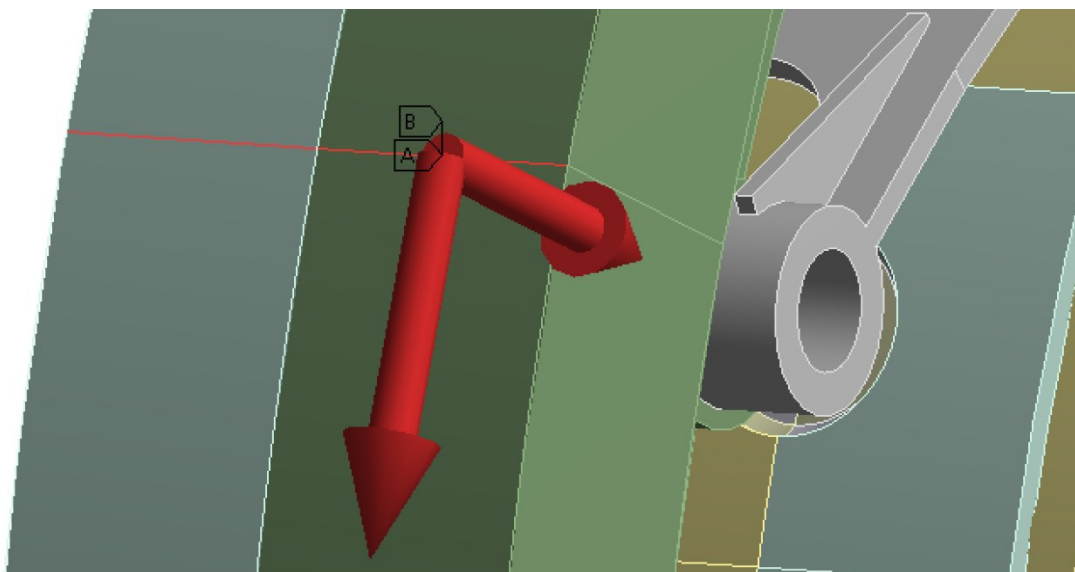
S umístěním okrajových podmínek, jak je vyobrazeno a popsáno výše, byla provedena simulace. Z výsledků je patrné, že princip rozložení napětí je stejný jako v předchozím případě. Maximální hodnota redukovaného napětí se snížila v řádu jednotek, tudíž pro další výpočty a závěry se použilo maximum z předchozího výpočtu, kde je zatížení umístěno mezi klouby.



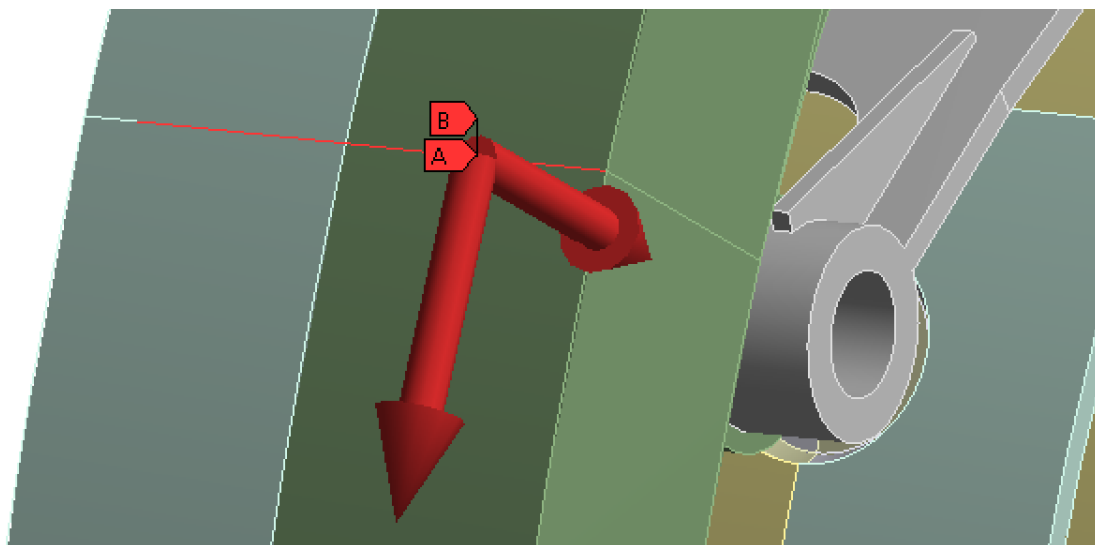
Obrázek 5.30 – Pootočený pohon s pery „Návrh č.2“: Redukované napětí [MPa]

## 5.4 Analýza pohonu s navrženými pery č. 2 s uvážením nesymetrie zatížení

V další eventualitě, která byla provedena, bylo uvažováno, že zatížení od pastorku působící na ozubeném věnci je nesymetrické. V předchozích případech byla radiální a tangenciální síla aplikována na celou šířku pomyslného ozubení věnce. V tomto případě bude v simulaci shodné nastavení, co se týče velikosti těchto sil, ale budou působit pouze na 90 % šířky pomyslného ozubení. Jednotlivá nastavení lze vidět na obrázcích níže.



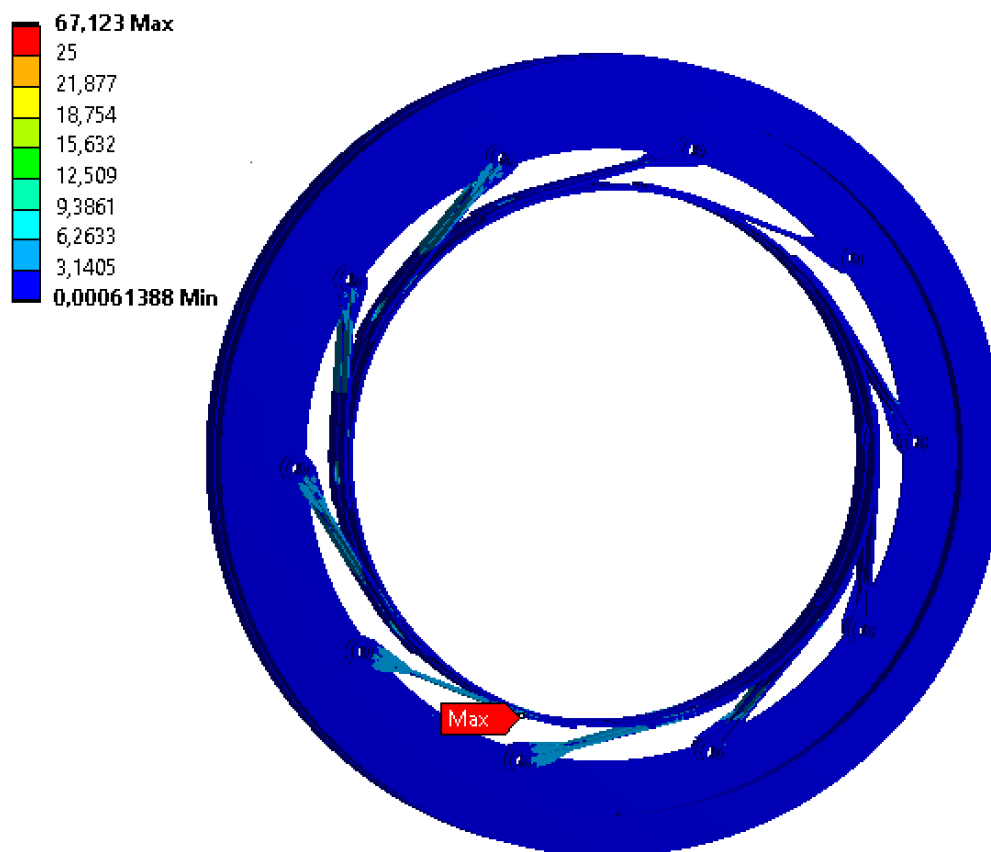
Obrázek 5.31 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Původní rozložení zatížení



Obrázek 5.32 – Pohon s pery „Návrh č.2“: Nesymetrické rozložení zatížení



Po provedení simulace bylo zjištěno, že rozložení zatížení na 90 % šířky pomyslného ozubení nemá vliv na rozložení napětí ani na jeho velikost. Maximální redukované napětí se změnilo pouze v řádech desetin MPa a za stěžejní výsledek je stále považováno 68 MPa z první simulace pohonu s novou konstrukcí pera.



Obrázek 5.33 – Pohon s pery „Návrh č.2“ (nesymetrie): Redukované napětí [MPa]

## 6. Kontrola pohonu vůči únavovému poškození

Po provedení simulace pohonu navrženého řešení s různými variantami v nastavení byly získány výsledky, ze kterých lze jasně predikovat, že svarové připojení per nebude zatíženo tak významně, jako tomu bylo v případě sestavy pohonu s původní konstrukcí připojení per. I přes výrazně nižší maximální redukované napětí bylo zapotřebí provést analytický výpočet na kontrolu vůči únavovému poškození, aby byla potvrzena vhodnost konstrukce k použití v provozu.

Únavové poškození vzniká vlivem cyklického zatěžování. Působením cyklického zatěžování dochází k poškození objemu materiálu na mikroskopické úrovni. S narůstajícím počtem cyklů dochází ke kumulaci poškození, což má za důsledek únavový lom, ke kterému dochází při napětí výrazně nižším, než je konvenční mez kluzu  $R_e$ . Napětí menší než mez kluzu nelze zpravidla považovat za bezpečné, a proto je nutná kontrola vůči únavovému poškození.

Pro kontrolu vůči únavovému poškození bylo použito Crosslandovo kritérium, které říká, že k únavovému poškození dojde, jestliže platí v libovolném časovém okamžiku:

$$\sigma_{ek}(t) = \sigma_{aMHM}(t) + \alpha_C \sigma_{m,max} > \sigma_{CC} \quad (6.1)$$

kde	$\sigma_{ek}$	- je ekvivalentní napětí [MPa],
	$\sigma_{aMHM}$	- je amplituda napětí podle hypotézy MHM [MPa],
	$\alpha_C$	- je materiálová konstanta [–],
	$\sigma_{m,max}$	- je maximální střední napětí [MPa],
	$\sigma_{CC}$	- je mez únavy dle Crosslanda. [MPa].

Pro výpočet byly z programu Ansys Workbench získány průběhy jednotlivých hlavních napětí v nejvíce namáhaném místě svaru.

$\sigma_1$	45,6	60,2	47,17	12,35	22,33	25,49	16,27	3,45	12,61	28,96
$\sigma_2$	11,49	14,71	12,47	3,58	16,51	17,09	8,41	0,28	4,12	7,93
$\sigma_3$	-3,45	-3,32	-1,16	-0,32	11,97	6,07	-3,47	-5,58	0,74	-0,38

Obrázek 6.1 – Tabulka hlavních napětí

Z průběhů jednotlivých hlavních napětí byly zjištěny jejich horní a dolní napětí a následně vypočteny jednotlivé amplitudy napětí.

Horní napětí cyklu 1  $\sigma_{h1} = 60,2 \text{ MPa}$

Dolní napětí cyklu 1  $\sigma_{d1} = 3,45 \text{ MPa}$

---

$$\sigma_{a1} = \frac{\sigma_{h1} - \sigma_{d1}}{2} = \frac{60,2 - 3,45}{2} = 28,375 \text{ MPa} \quad (6.2)$$

Horní napětí cyklu 2  $\sigma_{h2} = 17,09 \text{ MPa}$

Dolní napětí cyklu 2  $\sigma_{d2} = 0,28 \text{ MPa}$

---

$$\sigma_{a2} = \frac{\sigma_{h2} - \sigma_{d2}}{2} = \frac{17,09 - 0,28}{2} = 8,405 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

Horní napětí cyklu 3  $\sigma_{h3} = 11,97 \text{ MPa}$

Dolní napětí cyklu 3  $\sigma_{d3} = -5,58 \text{ MPa}$

---

$$\sigma_{a3} = \frac{\sigma_{h3} - \sigma_{d3}}{2} = \frac{11,97 - (-5,58)}{2} = 8,775 \text{ MPa} \quad (6.4)$$

Amplituda napětí podle hypotézy HMM:

Amplituda napětí 1  $\sigma_{a1} = 28,375 \text{ MPa}$

Amplituda napětí 2  $\sigma_{a2} = 8,405 \text{ MPa}$

Amplituda napětí 3  $\sigma_{a3} = 8,775 \text{ MPa}$

---

$$\sigma_{aHMM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{a1} - \sigma_{a2})^2 + (\sigma_{a1} - \sigma_{a3})^2 + (\sigma_{a2} - \sigma_{a3})^2} \quad (6.5)$$

$$\sigma_{aHMM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(28,375 - 8,405)^2 + (28,375 - 8,775)^2 + (8,405 - 8,775)^2}$$

$$\sigma_{aHMM} = 19,79 \text{ MPa}$$

Materiálová konstanta:

$$\alpha_c = \frac{3 \left( \sigma_c - \frac{\sigma_{hc}}{2} \right)}{\sigma_{hc} - \sigma_c} \quad (6.6)$$

kde  $\sigma_c$  - je mez únavy pro symetricky střídavý cyklus,

$\sigma_{hc}$  - je mez únavy pro mívivý cyklus.

---

Tyto konvenční meze únavy jsou funkcemi konvenční meze pevnosti  $R_m$ .

Mez pevnosti	$R_m = 360 \text{ MPa}$
--------------	-------------------------

---

$$\sigma_c = 0,36 \cdot R_m + 13 \quad (6.7)$$

$$\sigma_c = 0,36 \cdot 360 + 13 = 142,6 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{hc} = 0,59 \cdot R_m + 38 \quad (6.8)$$

$$\sigma_{hc} = 0,59 \cdot 360 + 38 = 250,4 \text{ MPa}$$

Mez únavy pro symetricky střídavý cyklus	$\sigma_c = 142,6 \text{ MPa}$
--	--------------------------------

Mez únavy pro mívivý cyklus	$\sigma_{hc} = 250,4 \text{ MPa}$
-----------------------------	-----------------------------------

---

$$\alpha_c = \frac{3 \left( \sigma_c - \frac{\sigma_{hc}}{2} \right)}{\sigma_{hc} - \sigma_c}$$

$$\alpha_c = \frac{3 \left( 142,6 - \frac{250,4}{2} \right)}{250,4 - 142,6} = 0,4842$$

Maximální střední napětí v průběhu zatěžovacího cyklu:

Horní napětí cyklu 1	$\sigma_{h1} = 60,2 \text{ MPa}$
Horní napětí cyklu 2	$\sigma_{h2} = 17,09 \text{ MPa}$
Horní napětí cyklu 3	$\sigma_{h3} = 11,97 \text{ MPa}$

---


$$\sigma_{mmax} = \frac{\sigma_{h1} + \sigma_{h2} + \sigma_{h3}}{3} = \frac{60,2 + 17,09 + 11,97}{3} = 29,75 \text{ MPa} \quad (6.9)$$

Ekvivalentní napětí:

Amplituda napětí podle hypotézy HMM	$\sigma_{aHMM} = 19,79 \text{ MPa}$
Materiálová konstanta	$\alpha_c = 0,4842$
Maximální střední napětí zatěžovacího cyklu	$\sigma_{mmax} = 29,75 \text{ MPa}$

---


$$\sigma_{ek} = \sigma_{aHMM} + \alpha_c \sigma_{m,max} = 19,79 + 0,4842 \cdot 29,75 = 34,2 \text{ MPa} \quad (6.10)$$

Mez únavy dle Crosslanda:

Mez únavy pro symetricky střídavý cyklus ( $R_m$ )	$\sigma_c = 142,6 \text{ MPa}$
Materiálová konstanta	$\alpha_c = 0,4842$

---


$$\sigma_{cc} = \sigma_c + \alpha_c \cdot \frac{\sigma_c}{3} = 142,6 + 0,4842 \cdot \frac{142,6}{3} = 165,6 \text{ MPa} \quad (6.11)$$

Crosslandovo kritérium:

$$\sigma_{ek}(t) = \sigma_{aHMM}(t) + \alpha_c \sigma_{m,max} > \sigma_{cc}$$

$$34,2 < 165,6$$

Bezpečnostní faktor:

$$k = \frac{\sigma_{cc}}{\sigma_{ek}} = \frac{165,6}{34,2} = 4,84 \quad (6.12)$$

Podmínka pro tvorbu únavového poškození dle Crosslandova kritéria nebyla splněna, tudíž dle hodnot získaných ze simulace a provedeného výpočtu nedojde k únavovému poškození.

Stejný výpočet byl proveden i pro původní řešení, kde  $\sigma_{ek}(t) = 182,4 \text{ MPa}$  překročilo mez únavy, čímž se potvrdil skutečný vznik únavové trhliny za provozu zařízení.

## 7. Závěr

Předmětem diplomové práce je analýza jednoho prvku sestavy pohonu sušicího bubnu. Sestava se skládá z ozubeného věnce, bubnu a deseti per, která jsou pevně spojena prostřednictvím svaru s bubnem. Cílem práce je navržení nového připojení per pohonu sušicího bubnu, jelikož během provozu právě zde docházelo k tvorbě únavových trhlin.

Analýza byla rozdělena na několik částí. V první části bylo analyzováno samotné pero v jeho původním řešení za podmínek, které přesně neodpovídaly reálnému provoznímu zatížení. Tyto podmínky sloužily pouze k nalezení adekvátní konstrukce, která zajistí významný pokles napětí. Z výsledků původní konstrukce bylo zjištěno, že čelo svaru představuje v podstatě vrub a koncentruje se v něm napětí. Na základě pochopení výsledků analýzy původní konstrukce byly vytvořeny další geometrie takovým způsobem, aby rozložily silový tok a tím se snížila maximální hodnota redukovaného napětí, která se vyskytovala na čele svaru. Varianta s kruhovou výsečí snížila maximální redukované napětí o přibližných  $\Delta\sigma = 80 \text{ MPa}$ , zatímco varianta s kruhovým otvorem snížila maximální redukované napětí o cca  $\Delta\sigma = 200 \text{ MPa}$ . Na základě těchto výsledků byla dále použita pouze varianta pera s kruhovým otvorem.

V další části byla provedena analýza pohonu s reálným zatížením konstrukce, která byla rozdělena na dva kroky, a to na zatížení vlastní tíhou a na celkové provozní zatížení. Při zatížení pouze vlastní tíhou mělo maximální redukované napětí hodnotu necelých  $\sigma_{1t} = 111 \text{ MPa}$  a celkové posunutí mírně přesáhlo  $\varepsilon_{1t} = 0,1 \text{ mm}$ . Při provozním zatížení se v kritickém místě, tedy v čele svaru, maximální redukované napětí dostalo na hodnotu  $\sigma_{1c} = 238 \text{ MPa}$  a celkové posunutí přesáhlo hodnotu  $\varepsilon_{1c} = 0,13 \text{ mm}$ .

Následující analýza byla analýza pohonu s novou konstrukcí per, tedy per s kruhovými otvory. Touto simulací byly potvrzeny předpoklady z analýzy samotného pera a to, že nová konstrukce připojení per lépe rozkládá silový tok a tím významně snižuje maximální redukované napětí. Analýza byla opět rozdělena do dvou kroků, a to na zatížení vlastní tíhou a na provozní zatížení. Při zatížení vlastní tíhou posunutí stouplo ve srovnání s původním řešením k hodnotě cca  $\varepsilon_{2t} = 0,2 \text{ mm}$ , což je důsledek snížení tuhosti pera kruhovým otvorem. Maximální redukované napětí ovšem kleslo k hodnotě cca  $\sigma_{2t} = 41 \text{ MPa}$ . Při provozním zatížení mělo celkové posunutí hodnotu necelých  $\varepsilon_{2c} = 0,23 \text{ mm}$  a maximální redukované napětí  $\sigma_{2c} = 68 \text{ MPa}$ . Takto razantní pokles potvrdil kvalitu nové konstrukce připojení per. Určité zvýšení hodnot celkového posunutí není problematické vzhledem k tomu, že se pohybuje v rámci desetin  $\text{mm}$ , zatímco celá konstrukce pohonu dosahuje průměru 5 metrů.

V práci se dále pokračuje dvěma odlišnými variantami analýzy pohonu s nově navrženou konstrukcí per. První varianta představuje analýzu sestavy pohonu pootočenou o  $18^\circ$ . Maximální redukované napětí mělo hodnotu cca  $\sigma_{2c} = 66 \text{ MPa}$ , čímž se potvrdilo, že nebude docházet k vyššímu zatížení svarového připojení per, než tomu bylo v předchozím případě. Ve druhé zmiňované variantě se předpokládá, že zatížení působící na ozubený věnec je nesymetrické, tedy nepůsobí na celé délce, ale jen na 90 % délky pomyslného ozubení ozubeného věnce a je umístěno nesymetricky. V tomto případě se prokázalo, že takový způsob rozložení zatížení nemá podstatný vliv na výsledky, které se od varianty, kde zatížení je rozloženo na 100 % délky pomyslného ozubení, liší pouze o desetiny  $\text{MPa}$ .

Po konečno-prvkových analýzách byl proveden analytický výpočet na únavové poškození svarového připojení per pro nově navrženou konstrukci připojení per. Mez únavy byla zjednodušeným výpočtem stanovena na  $\sigma_{cc} = 165,6 \text{ MPa}$  a ekvivalentní napětí, které je možné porovnat s mezí únavy, bylo stanoveno na  $\sigma_{ek} = 34,2 \text{ MPa}$ . Porovnáním těchto hodnot bylo možné vyslovit tento závěr: Na základě těchto výsledků nebude docházet k únavovému poškození.



## 8. Seznam použité literatury

- [1] Výkresová dokumentace firmy Trinom s.r.o
- [2] CHEN, Xiaolin a Yijun LIU. *Finite element modeling and simulation with ANSYS Workbench*. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Franics Group, [2015]. ISBN 978-1-4398-7384-7.
- [3] ANSYS Inc, ANSYS Academic Research, Release 18, Help System
- [4] ANSYS Mechanical User's Guide, © 2013 SAS IP, Inc., Release 16.1, pp. 1858
- [5] Tutorials for ANSYS Workbench <http://www.ansys.com/tutorials>
- [6] *Trinom s.r.o* [online]. Přerov: Trinom, 2016 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://www.trinomprerov.cz/>
- [7] KROUPA, Zdeněk. *SUŠENÍ BIOMASY* [online]. Brno, 2017 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=150222](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150222). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Marek Baláš, Ph.D.
- [8] RAFAJ, Svatomír. *ROTAČNÍ SUŠÍCÍ A SINTROVACÍ PECE* [online]. Brno, 2018 [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=173431](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=173431). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Pavel Skryja, Ph.D.
- [9] Sušárna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Su%C5%A1%C3%A1rna>
- [10] ŠNITA, Dalimil. *Chemické inženýrství I*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2005. ISBN 80-7080-589-7.
- [11] *Spoje ocelových konstrukcí* [online]. Brno: VUT v Brně [cit. 2020-04-18]. Dostupné z: <http://ocel.wz.cz/index.html>
- [12] Svařování. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD>

Obrázky:

- [13] Buben rotační válcové pece. In: *Trinomprerov* [online]. Přerov: Trinom, 2016 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [https://www.trinomprerov.cz/gallery-storage/1/297\\_big.jpeg](https://www.trinomprerov.cz/gallery-storage/1/297_big.jpeg)
- [14] Rotační válcová pec. In: *Trinomprerov* [online]. Přerov: Trinom, 2016 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: [https://www.trinomprerov.cz/gallery-storage/1/197\\_big.jpeg](https://www.trinomprerov.cz/gallery-storage/1/197_big.jpeg)
- [15] Schéma rotační válcové pece. *Chemické inženýrství I.* [online]. Praha: VŠCHT, 2005, s. 259 [cit. 2020-04-19]. ISBN 80-7080-589-7. Dostupné z: [http://147.33.74.135/knihy/uid\\_isbn-80-7080-589-7/pdf/259.pdf](http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-589-7/pdf/259.pdf)
- [16] Nosné obruče. In: *Rotarykilnfactory* [online]. Anyang: AGICO GROUP, 2019 [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://www.rotarykilnfactory.com/wp-content/uploads/2019/09/rotary-kiln-equipment-1.jpg>
- [17] Řetězový mechanismus [online]. In: . [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <https://3.imimg.com/data3/KW/QY/MY-3976169/conveyor-roller-500x500.jpg>
- [18] Převodový mechanismus. In: *Eztm* [online]. Moskva: eztm [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://www.eztm.ru/upload/iblock/fb7/fb7d9072ce3070465955e99065a70fc8.jpg>
- [19] Schéma koutového svaru. In: *Ocel.wz* [online]. Brno: VUT [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://ocel.wz.cz/svarove-spoje/img/24.jpg>
- [20] Schéma rozložení zatížení ve svaru. In: *Ocel.wz* [online]. Brno: VUT [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://ocel.wz.cz/svarove-spoje/img/28.jpg>
- [21] Schéma rozložení zatížení ve svaru. In: *Ocel.wz* [online]. Brno: VUT [cit. 2020-04-19]. Dostupné z: <http://ocel.wz.cz/svarove-spoje/img/30.jpg>

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou vyjádřil své poděkování prof. Ing. Petrovi Horylovi, CSc., dr.h.c. za jeho cenné rady, trpělivost a ochotu při vedení mé diplomové práce.

Zároveň bych rád poděkoval Ing. Petrovi Ferfeckemu Ph.D., rovněž za jeho ochotu a trpělivost při řešení mé diplomové práce.

V neposlední řadě děkuji své rodině a Aničce za neustálou podporu v průběhu studia.